



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



departament
Conservació
Restauració
Bens
Culturals

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Conservación y Restauración de Bienes
Culturales

ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE LA EFICACIA DE DOS
PRODUCTOS NO CONVENCIONALES EN LA
CONSOLIDACIÓN DE CARBÓN VEGETAL DE
PROCEDENCIA ARQUEOLÓGICA

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Conservación y Restauración de Bienes
Culturales

AUTOR/A: Salvador Núñez, Claudia

Tutor/a: Carrascosa Moliner, María Begoña

Cotutor/a: Osete Cortina, Laura

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

La investigación presentada en este Trabajo de Final de Máster pretende evaluar la eficacia de dos productos consolidantes para la madera carbonizada de procedencia arqueológica. Los productos seleccionados han sido uno de base acuosa, el Acril ME®, y uno de base disolvente, el Rexil®. En la experimentación se han testado diferentes metodologías de aplicación las cuales han consistido en la impregnación a pincel a una y a dos manos e inmersión. Para la evaluación de la eficacia de los consolidantes se ha seguido una metodología experimental que se vale del empleo de técnicas de análisis y de ensayos para evaluar la eficacia de los tratamientos, que han consistido en un examen morfológico a través de microscopía óptica, la determinación de las variaciones del brillo y de las coordenadas cromáticas, la evaluación del comportamiento hídrico a partir del ensayo normalizado de la absorción de la gota y el estudio sobre las propiedades mecánicas a partir del ensayo de dureza. Finalmente, se ha realizado el análisis mediante Espectroscopía ATR-FTIR para evaluar y comparar el nivel de penetración de los consolidantes en el material.

La experimentación se ha realizado sobre probetas de material lúneo carbonizado comercial llevando a cabo un estudio previo de sus propiedades físicas (dureza, comportamiento hídrico y características ópticas) que han permitido clasificar las probetas en diferentes categorías para la evaluación posterior de la eficacia de los tratamientos consolidantes. A partir de los ensayos se ha realizado una comparativa entre las maderas que presentan unos niveles más altos de dureza y menor capacidad de absorción frente a las maderas que presentan un valor más bajo de dureza y una mayor velocidad de absorción. De esta manera se pretende estudiar el comportamiento de los consolidantes según el grado de carbonización de la madera.

Los resultados obtenidos a partir de esta investigación han permitido determinar que el producto consolidante y la metodología de aplicación más adecuados han sido el consolidante Rexil® aplicado por inmersión. Por ello, fue aplicado en diferentes fragmentos de carbón arqueológico procedentes del yacimiento de las Termas Romanas de Mura proporcionando óptimos resultados en la consolidación. Con esta investigación se está aportando una alternativa eficaz a los tratamientos convencionales para la consolidación de este tipo de material.

PALABRAS CLAVE

Madera carbonizada, consolidación, análisis fisicoquímicos, Termas Romanas de Mura, Acril ME® y Rexil®

RESUM

La investigació presentada en aquest treball de final de màster pretén avaluar l'eficàcia de dos productes consolidants per a la fusta carbonitzada de procedència arqueològica. Els productes seleccionats han sigut un de base aquosa, l'Acril ME®, i un de base dissolvent, el Rexil®. A l'experimentació s'han testat diferents metodologies d'aplicació les quals han consistit en la impregnació a pinzell a una i a dues mans i immersió. Per a l'avaluació de l'eficàcia dels consolidants s'ha seguit una metodologia experimental que es val de l'ús de tècniques d'anàlisi i d'assajos per avaluar l'eficàcia dels tractaments, que han consistit en un examen morfològic mitjançant microscòpia òptica, la determinació de les variacions de la brillantor i les coordenades cromàtiques, l'avaluació del comportament hídric a partir de l'assaig normalitzat de l'absorció de la gota i l'estudi sobre les propietats mecàniques a partir de l'assaig de duresa. Finalment, s'ha realitzat l'anàlisi mitjançant Espectroscòpia ATR-FTIR per avaluar i comparar el nivell de penetració dels consolidants al material.

L'experimentació s'ha realitzat sobre provetes de material ligni carbonitzat comercial duent a terme un estudi previ de les propietats físiques (duresa, comportament hídric i característiques òptiques) que han permès classificar les provetes en diferents categories per a l'avaluació posterior de l'eficàcia dels tractaments consolidants. A partir dels assajos s'ha realitzat una comparativa entre les fustes que presenten uns nivells més alts de duresa i menor capacitat d'absorció davant de les fustes que presenten un valor més baix de duresa i una velocitat d'absorció major. D'aquesta manera, es pretén estudiar el comportament dels consolidants segons el grau de carbonització de la fusta.

Els resultats obtinguts a partir d'aquesta recerca han permès determinar que el producte consolidant i la metodologia d'aplicació més adequats han estat el consolidant Rexil® aplicat per immersió. Per això, va ser aplicat a diferents fragments de carbó arqueològic procedents del jaciment de les Termes Romanes de Mura proporcionat òptims resultats en la consolidació. Amb aquesta investigació s'està aportant una alternativa eficaç als tractaments convencionals per consolidar aquest tipus de material.

PARAULES CLAU

Fusta carbonitzada, consolidació, anàlisi fisicoquímiques, Termes Romanes de Mura, Acril ME® i Rexil®

ABSTRACT

The research presented in this Final Master's Project aims to evaluate the effectiveness of two consolidating products for charred wood of archaeological origin. The selected products have been a water-based one, Acril ME®, and a solvent-based one, Rexil®. In the experimentation different application methodologies have been tested, which have consisted of single and two-coat brush impregnation and immersion. For the evaluation of the effectiveness of the consolidants, an experimental methodology has been followed that involves the performance of analysis and test to evaluate the effectiveness of the treatments which have consisted of a morphological examination by optical microscopy, the determination of variations in gloss and the chromatic coordinates, the evaluation of water behavior using the standardized drop absorption test and the study on the mechanical properties using the hardness test. Finally, an ATR-FTIR spectroscopy analysis was carried out to evaluate and compare the penetration level of the binders in the material.

The experimentation has been carried out on specimens of commercial carbonized ligneous material, carrying out a preliminary study of their physical properties (hardness, water behavior and optical characteristics) which allowed the specimens to be classified into different categories for the subsequent evaluation of the effectiveness of the consolidant treatments. On the basis of the tests, a comparison has been made between the woods with higher levels of hardness and lower absorption capacity and woods with lower hardness value and higher absorption speed. In this way, the aim is to study the behavior of the consolidants according to the degree of carbonization of the wood.

The results obtained from this research have made it possible to determine that the most suitable consolidating product and application methodology have been the Rexil® consolidating agent applied by immersion. That is why it was applied to different fragments of archaeological coal from the site of the Roman Baths of Mura, providing optimum results in consolidation. This research is providing an effective alternative to conventional treatments to consolidate this type of material.

KEYWORDS

Charred wood, consolidation, physicochemical analysis, Mura Roman Baths, Acril ME® and Rexil®

ÍNDICE

1. Introducción	7
1.1. Motivación	7
1.2. La madera carbonizada	8
1.2.1. Estructura y composición de la madera	8
1.2.2. Proceso de carbonización	11
1.2.3. La consolidación de madera carbonizada	12
2. Objetivos	14
3. Metodología	15
4. Materiales y técnicas	17
4.1. Contextualización del carbón de procedencia arqueológica	17
4.2. Caracterización del material de estudio	19
4.3. Preparación de las probetas de laboratorio	20
4.4. Los consolidantes	23
4.4.1. Estudio de las propiedades de los productos consolidantes	23
4.4.2. Preparación de los consolidantes	24
4.5. Consolidación de las probetas	26
4.5.1. Consolidación mediante impregnación	26
4.5.2. Consolidación mediante inmersión	26
4.6. Consolidación de las muestras de carbón vegetal de procedencia arqueológica	28
4.7. Técnicas de análisis, ensayos e instrumental para la caracterización e identificación de la madera carbonizada	29
4.7.1. Caracterización morfológica por microscopía óptica	29
4.7.2. Medición del brillo	30
4.7.3. Estudio colorimétrico	30
4.7.4. Evaluación de las propiedades mecánicas: Dureza Shore D	31
4.7.5. Evaluación del comportamiento hídrico: Ensayo de la absorción de la gota	32
	5

4.7.6. Análisis químico mediante Espectroscopía ATR-FTIR	33
5. Resultados y discusión	35
5.1. Estudio micromorfológico mediante microscopia óptica	35
5.2. Evaluación de las características ópticas	40
5.2.1. Colorimetría	40
5.2.2. Fotometría	43
5.3. Evaluación de las propiedades mecánicas: Dureza Shore D	44
5.4. Evaluación del comportamiento hídrico: Ensayo de la absorción de la gota	45
5.5. Evaluación de la profundidad de penetración del tratamiento consolidante: Espectroscopía ATR-FTIR	47
6. Estudio de las muestras de madera carbonizada de origen arqueológico	52
7. Conclusiones	55
8. Bibliografía	58
9. Índice de figuras y tablas	62
10. Agradecimientos	68
11. Anexos	69
11.1. Anexo 1: Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030	69
11.2. Anexo 2: Datos obtenidos en la realización de los ensayos	71

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La madera es uno de los recursos naturales más utilizados desde los orígenes de la humanidad debido a su abundancia, disponibilidad y sus características y propiedades físicas: flexibilidad, dureza variable, resistencia y fácil manufactura¹. Su naturaleza orgánica conlleva a que se trate de un material difícil de conservar, esto empeora cuando se trata de madera de origen arqueológico, pues no se conserva en el subsuelo. La madera tan solo se preserva en ambientes muy secos o subacuáticos cuando las condiciones ambientales son favorables y estables, es decir, cuando la presencia de oxígeno, la acidez del suelo, la actividad biológica o las fluctuaciones de humedad no suponen un peligro². No obstante, una de las posibles maneras de hallar madera en las excavaciones arqueológicas es en estado de carbón. Los restos vegetales carbonizados son hallados frecuentemente en yacimientos donde los humanos utilizaron el fuego o como consecuencia de un incendio y constituyen una fuente de información importante ya que permiten obtener datos sobre la composición de la vegetación y la evolución del paisaje a lo largo de los años, es decir, sobre los paleoambientes pasados³. También, nos otorgan conocimiento sobre el consumo y la explotación de los recursos leñosos en los distintos periodos de la historia humana y contextos geográficos.

La madera carbonizada arqueológica es un material sensible, ya que presenta una estructura degradada, debilitada y con una fuerte descohesión, por ello el tratamiento prioritario para lograr su preservación es la consolidación. La consolidación es uno de los tratamientos más importantes entre las intervenciones que se realizan en la conservación y restauración, ya que permite devolver la cohesión y la resistencia mecánica a los materiales intervenidos, pero este proceso no ha de suponer un cambio en la morfología de la pieza, permitiendo su caracterización posterior.

Existen estudios realizados sobre la consolidación de carbón, sin embargo, estos son escasos y suelen basarse en el empleo de consolidantes de uso tradicional, algunos de ellos como es el Paraloid® B-72, el Polivinil butyral y el Mowilith® 60, entre otros. Es por ello por lo que se ha considerado necesario la realización de una investigación para evaluar la eficacia de dos tratamientos consolidantes actuales que han proporcionado buenos resultados en materiales porosos, pero que no se ha evaluado su eficacia en material lúneo carbonizado. De esta manera, los productos consolidantes seleccionados para la investigación han sido el Rexil® y el Acril ME®.

Por todo ello, el propósito de este trabajo es contribuir en el estudio sobre los tratamientos de conservación para este tipo de material con el fin de aportar un mayor conocimiento sobre aquellos productos y métodos más adecuados para su preservación.

¹ DILOLI FONS, Jordi *et al.* “El pilar de fusta de L’Assut. Conservació i restauració d’una biga de fusta arqueològica d’origen terrestre”. *UNICUM*, 2014. núm. 13. p. 59.

² DILOLI FONS, Jordi *et al.* *Op. cit.*, p. 59

³ PIQUÉ I HUERTA, Raquel. “Los carbones y las maderas de contextos arqueológicos y el paleoambiente”. *Ecosistemas.*, España: Asociación Española de Ecología Terrestre, 2006. vol. 15, núm. 1. p. 31

1.2. La madera carbonizada

Para poder determinar qué tratamientos de conservación son los más adecuados para los objetos degradados es necesario tener un conocimiento previo sobre su naturaleza y características fisicoquímicas. En el caso de la madera carbonizada también es importante conocer su proceso de carbonización, lo cual nos ayudará a comprender su comportamiento físico-mecánico y el estado de degradación del material.

1.2.1. Estructura y composición de la madera

La madera o xilema es un material orgánico procedente de un organismo vivo y está formada por varios tipos de células, que llevarán a cabo sus tres funciones principales: el transporte de la savia, la función estructural sosteniendo el vegetal y proporcionando resistencia, y el almacenamiento de productos vitales. En lo que respecta a su estructura, la madera está formada por una fina capa especializada en la creación de células denominada cambium que la convierte en el elemento esencial para el crecimiento del árbol. El desarrollo de células en el interior formará el xilema y en el exterior el floema, entre los cuales se sitúa el cambium vascular. La madera nueva llamada albura se superpone a la madera antigua desplazándola al interior del tronco dando lugar a la formación del duramen. Según la especie, la proporción de duramen o albura es muy variable^{4,5}.

En lo que respecta a la composición química, el tejido vegetal está formado por tres componentes químicos fundamentales presentes en todas las especies de madera, pero en diferentes proporciones:

- La **celulosa**: Es el componente principal de la pared celular de las plantas y constituye la mayor proporción con respecto al resto de los componentes de la madera, siendo aproximadamente el 40-45% del peso total de la madera. Es un polisacárido compuesto por monómeros de glucosa formando cadenas lineales, que se unen entre sí mediante enlaces de puentes de hidrógeno, estas a su vez constituyen las fibrillas elementales, que después se agruparán para constituir las microfibras que se integrarán en las paredes celulares. Las microfibras celulósicas se encuentran sumidas en una matriz donde se encuentra la hemicelulosa y la lignina⁶.
- La **hemicelulosa**: La hemicelulosa es otro polisacárido presente en la pared celular de las plantas, incluida la madera. A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa es un polímero no lineal y más complejo, ya que está compuesta por diferentes azúcares, como la glucosa, la galactosa, la arabinosa y la xilosa, entre otros. La hemicelulosa representa entre el 20-30% del peso total de la madera y es la encargada de proporcionar flexibilidad y cohesión a la estructura. A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa es soluble en agua y otros solventes alcalinos débiles. Es menos resistente que la celulosa, pero aún contribuye a las propiedades mecánicas de la madera.
- La **lignina**: A diferencia de la celulosa y la hemicelulosa, la lignina no es un polisacárido, es un polímero tridimensional formado por unidades de fenilpropano que se enlazan entre

⁴ SIERRA MÉNDEZ, Juan Luis. "La conservación de la madera arqueología subacuática. Museo y centro nacional de investigaciones arqueológicas submarinas". *Monte Buceiro*, Ayuntamiento de Santoña, 2003, núm. 9. p. 229.

⁵ CARRERAS RIVERY, Raquel; PÉREZ MARÍN, Eva. *Maderas en bienes culturales europeos Identificación microscópica y casos prácticos*. 1ª ed. Universitat Politècnica de València, 2018. p. 6

⁶ SIERRA MÉNDEZ, Juan Luis. *Op. cit.*, pp. 231-232

sí mediante enlaces de carbono-carbono. Presenta un mayor contenido de carbono en su molécula en comparación con la celulosa y la hemicelulosa. Se encuentra entre el 20-25% del peso de la madera. La lignina confiere a la madera estabilidad dimensional y su función es la de cohesionar las células entre sí y dar rigidez a las paredes celulares, así como protegerla del ataque de insectos. La estructura química compleja de la lignina dificulta su descomposición.

Estos tres componentes químicos principales interactúan para conferirle a la madera sus propiedades fisicoquímicas, pero, además, se encuentran también sustancias extractables, agua y, en menor contenido, sales minerales.

El agua presente en la madera se encuentra en forma de: agua de constitución, agua de saturación y agua libre. Cuando la madera está es sometida al medio ambiente empieza a perder su contenido en agua dando lugar al proceso de secado. Primero pierde el agua libre y seguidamente el agua higroscópica, sin embargo, el agua de constitución se pierde tan solo en el proceso de combustión de la madera.

En lo que respecta al estudio de la madera y del carbón se emplean análisis de antracología, dendrología y radiocarbono. El estudio antracológico es la principal disciplina empleada en el estudio de los restos vegetales carbonizados hallados en contextos arqueológicos. La antracología nace como una rama de la botánica aplicada al periodo de la Prehistoria⁷ y nos aporta información cronológica, botánica y traceológica. Asimismo, a través del examen morfológico de la madera podemos identificar la especie y la familia a la que pertenece. De esta manera, según su estructura anatómica distinguimos entre dos grandes grupos de madera, procedente de las coníferas o de las frondosas. Las frondosas presentan poros mientras que las coníferas no, sin embargo estas últimas pueden presentar o no canales resiníferos. A diferencia de las frondosas, las coníferas poseen una estructura más sencilla. La identificación de la madera se realiza a partir del examen de sus tres cortes anatómicos: tangencial, transversal y longitudinal. En cada una de estas secciones, que se examinan al microscopio, se identifican los elementos anatómicos característicos que permiten identificar las especies:

⁷ BADAL, Ernestina. "La madera. Patrimonio cultural y biológico". *Métode. Materia de arte. La ciencia en el estudio y la conservación del patrimonio*, Universitat de València, 2008, núm. 53. p. 231.

CONÍFERAS⁸:

- Plano transversal (A): Se puede observar la presencia o no de los canales resiníferos (1), los radios leñosos (2), las traqueidas (3), las células epiteliales (4), las punteaduras areoladas (5 y 6), células del parénquima de los radios leñosos (7), etc.
- Plano radial (B): Podremos identificar los campos de cruce de gran importancia en la identificación de la especie, la presencia de engrosamientos de las traqueidas radiales (8), células del parénquima radial (9), etc.
- Plano tangencial (C): Se identifican las traqueidas, el parénquima radial, posibles canales resiníferos transversales (10), etc.

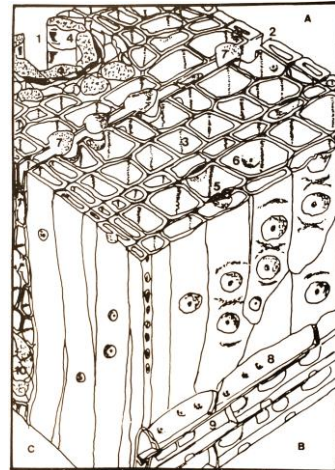


Fig. 1. Planos anatómicos con los elementos característicos de las coníferas

FRONDOSAS⁹:

- Plano transversal (A): Se observa la presencia o no de los anillos de crecimiento, los poros y su agrupación, los radios (1 y 2), vasos (3), fibrotraqueidas (4), parénquima longitudinal (5), punteaduras areoladas, etc.
- Plano radial (B): Se pueden identificar elementos vasales (6), las fibrotraqueidas radiales (7), células del parénquima longitudinal (8), radios leñosos (9), células marginales erectas (10), células interiores procumbentes (11), etc.
- Plano tangencial (C): Se pueden encontrar elementos vasales o porción de un vaso (12), las fibrotraqueidas (13), los radios (14), células marginales (15), células interiores procumbentes (16), etc.

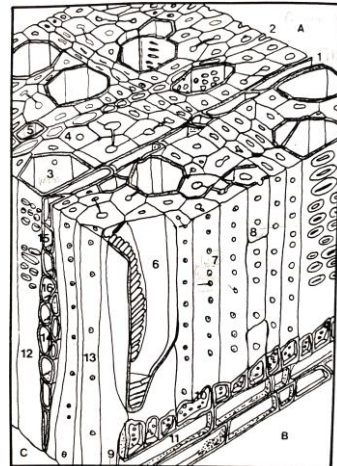


Fig. 2. Planos anatómicos con los elementos característicos de las frondosas

Los anteriores rasgos anatómicos confieren al material un carácter heterogéneo lo que se refleja en sus propiedades, como es el caso de la anisotropía. Esto se traduce en su diferente comportamiento físico-mecánico en función de la sección en la que se evalúen sus propiedades.

⁸ GARCÍA ESTEBAN, Luis; GUINDEO CASASÚS, Antonio. Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas. Madrid: AITIM, 1989. p.16

⁹ GARCÍA ESTEBAN, Luis; GUINDEO CASASÚS, Antonio. Anatomía de frondosas españolas. Madrid: AITIM, 1990. p. 18

1.2.2. Proceso de carbonización

Como ya se ha mencionado anteriormente, la manera más común de conservarse la madera en un contexto arqueológico terrestre es la carbonización. Debido a que el carbón presenta una buena estabilidad química y pocos son los organismos que pueden digerirlo, se preserva y es fácil de encontrar prácticamente en cualquier yacimiento arqueológico¹⁰.

Los restos de carbón de procedencia arqueológica pueden hallarse habitualmente en diversos contextos, como son: por el uso de madera en hogares, como consecuencia de incendios y la destrucción de techumbres, como utilización de la madera en hornos para distintas manufacturas o como hornos caloríficos para calentar agua (termas), como son los objetos de estudio de esa investigación.

Para la formación del carbón, la madera debe someterse a un proceso de combustión el cual consta de cuatro fases que ocurren a medida que se incrementan las temperaturas:

1. La **deshidratación**: La elevación de las temperaturas desencadena en la madera una serie de reacciones químicas terminando por provocar su descomposición térmica. Esta descomposición se inicia a partir de los 100°C, temperatura a la cual los enlaces químicos empiezan a romperse y la madera empieza a perder su contenido en agua.
2. La **torrefacción**: Tiene lugar con el aumento de la temperatura por encima de 170°C. En este estado, la madera preserva su morfología externa y permite su identificación botánica a partir de su estudio anatómico. A lo largo de estas dos primeras fases la madera pierde un 35% de su peso total en forma de vapor de agua, gases orgánicos y de anhídrido carbónico.
3. La **pirólisis** o **carbonización**: Cuando la temperatura supera los 270°C se inicia la descomposición exotérmica de la madera, la cual conlleva a la desintegración química de la celulosa y la lignina¹¹. En caso de que el proceso se detenga en esta fase se formará el carbón. En este estado la madera preservará su estructura anatómica y permitirá realizar la identificación botánica del carbón¹². En la carbonización no se destruye la estructura anatómica de la madera, sin embargo, la combustión provoca su deshidratación y consecuentemente su contracción. El encogimiento conlleva a que se generen fisuras hasta llegar a la fragmentación del carbón¹³.
4. La **cumburación**: En el caso de que la temperatura alcance los 700°C se producirá la cumburación, proceso que concluye con la madera reducida a cenizas¹⁴.

En el proceso de combustión de la madera las sustancias que la componen se oxidan transformándose en otros compuestos dando como resultado la formación de compuestos orgánicos como son los ácidos carboxílicos y compuestos fenólicos entre otros, además, se

¹⁰ JUÁREZ VALLADARES, Eric Omar R. "La madera arqueológica. Evidencias y condiciones de preservación". *La ciencia y el hombre*, 1998, núm. 30. pp. 14-15.

¹¹ NAVAS O., Sayra. "Horno de carbonización de laboratorio programable", *Tecnología en Marcha*, 2001, vol. 13, núm. 4. p.53

¹² BADAL, Ernestina. *Op. cit.*, p. 232.

¹³ PIQUÉ I HUERTA, Raquel. *Op. cit.*, p. 4.

¹⁴ CARRIÓN MARCO, Yolanda. 2005. "Dendrología y arqueología: las huellas del clima y de la explotación humana de la madera". En: *Avances de Arqueometría. Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría*, Universitat de Girona, 2005. p. 273

produce el desprendimiento de gases como el dióxido y el monóxido de carbono, hidrógeno, metano o etileno, entre otros¹⁵.

La madera carbonizada debido a su elevado estado de carbonización y de su nivel de descohesión es muy difícil de manipular por lo que tras su descubrimiento en un yacimiento es necesario tomar unas medidas adecuadas para lograr su preservación. El material suele hallarse en estado fragmentado por lo que limitar su manejo es importante para evitar pérdidas o su total desintegración.

1.2.3. La consolidación de madera carbonizada

A pesar de existir trabajos donde se evalúa la eficiencia de consolidantes de distinta naturaleza aplicados sobre madera carbonizada, los estudios siguen siendo escasos. Por ello, en este apartado se realizará una breve revisión de las investigaciones o trabajos de conservación y restauración llevados a cabo para la consolidación de objetos de madera en estado de carbonización.

Algunos de los primeros métodos empleados para la consolidación de carbón datan de principios del s. XX en los tratamientos realizados en el parque arqueológico de Herculano. Entre los distintos consolidantes empleados se identificaron una solución de aceite mineral añadido a la cera de parafina, una solución de cera y gasolina y una mezcla de polvo de carbón y cera de parafina, todos ellos dando malos resultados, pues los tratamientos formaban una gruesa capa que oscurecía los objetos tratados¹⁶.

Durante la década de 1960 y 1970 se propusieron resinas de carácter sintético y termoestables como las epoxídicas o de poliéster para la consolidación de madera arqueológica seca. No obstante, se consideraron inadecuadas debido a su irreversibilidad y el cambio en el aspecto superficial del material, entre otros motivos. Más adelante, estudios realizados en 1985 indicaron que resinas como el acetato de polivinilo, Paraloid® B-72 y el Polivinil butyral proporcionaban un incremento de la rigidez y la resistencia mecánica de la madera. Desde entonces se realizaron pruebas científicas para evaluar las cualidades de estas resinas termoplásticas empleadas como consolidantes¹⁷.

Hasta la actualidad, el empleo de productos acrílicos ha sido recurrente en la consolidación de madera carbonizada, y entre ellos, cabe destacar el uso del consolidante Paraloid® B-72. En general, los estudios indican que los tratamientos con resinas acrílicas ofrecen resultados óptimos en la consolidación de carbones arqueológicos, siendo el inconveniente principal el aumento del brillo superficial del carbón en ciertos casos, lo cual afecta a su aspecto estético, como ocurre con el Paraloid® B-72. Sin embargo, estos cambios estéticos no afectan negativamente a las propiedades fisicoquímicas del material y en comparación con otros consolidantes, las resinas acrílicas tienen ventajas significativas en términos de penetración y resistencia mecánica.

Si bien son escasos, varios estudios han sido realizados para la evaluación del comportamiento de varios productos adhesivos empleados como consolidantes en madera carbonizada. Estos han revelado los buenos resultados del Aquazol® 200, el Regalrez® 1126 y una mezcla del Paraloid® B-72 y B-67 (90:10), aplicados por medio de espray, sin que se

¹⁵ NAVAS O., Sayra. *Op. cit.*, p. 53.

¹⁶ CULLEN COBB, Kim. "Charred wood consolidated with thermoplastic resins". *ANAGPIC*. Buffalo State College. Art Conservation Department, 2005. p. 4.

¹⁷ SPIRYDOWICZ, Krysia E., *et al.* "Alvar and Butvar: The Use of Polyvinyl Acetal Resins for the Treatment of the Wooden Artifacts from Gordion, Turkey". *Journal of the American Institute for Conservation*, 2001, vol. 40. p. 45.

produzcan cambios estéticos significativos. Por el contrario, otros tratamientos consolidantes como el Cosmoloid® 80 y el Mowital® B 60 HH pueden proporcionar una capa superficial blanquecina sobre la superficie del carbón¹⁸.

Jordi Diloli Fons *et al*, compararon el efecto de los tratamientos de consolidación con Paraloid® B-72 y Mowilith® 60 en acetona y etanol, revelando que este último presentaba una menor capacidad de penetración, aunque produce un acabado menos brillante. En este estudio el consolidante Paraloid® B-72 fue aplicado *in situ* mediante inyección e impregnación¹⁹.

Otros de los tratamientos estudiados han sido el Polivinil butyral y el Butvar® B-98 aplicados por inmersión de la pieza tras la cual se somete a secado en estufa para determinar la influencia de la velocidad de secado del tratamiento, comprobándose que no se producían diferencias según la velocidad de secado en horno²⁰. Otros estudios describen las resinas a base de Polivinil butyral como muy adecuadas desde el punto de vista estético y en cuanto al nivel de penetración^{21,22}.

En lo que respecta a los métodos de aplicación de los productos consolidantes sobre el material, varios han sido probados, como son: impregnación, inmersión, inyección o bien mediante pulverización. A pesar de que no se discrimina ningún método de aplicación como negativo, los métodos de consolidación más frecuentes son mediante la inmersión e impregnación.

A continuación, se resumen las resinas empleadas para la consolidación de carbón arqueológico:

Resinas vinílicas y polivinílicas:

- Resinas de acetato de polivinilo: Mowilith® 20, 30 y 50²³ / Mowilith® 60
- Resinas vinilbutiral: Polivinil butyral, Mowital® B 60 HH / Butvar® B-90 y Butvar® B-98²⁴

Resinas acrílicas:

- Resina acrílica a base de Etil-metacrilato: Paraloid® B-72 / Paraloid® B-67

Otras resinas sintéticas:

- Aquazol® 200
- Regalrez® 1126

Cera microcristalina:

- Cosmoloid® H 80

¹⁸ PIZZO, B., *et al*. "On site consolidation of burnt and partially charred wood in dry conditions". *Journal of Cultural Heritage*. Mayenne: Elsevier, 2011, vol. 12. pp. 24-25

¹⁹ DILOLI FONTS, Jordi *et al*. *Op. cit.*, pp. 55-67

²⁰ CULLEN COBB, Kim. *Op.cit.*, pp. 2-20

²¹ SPIRYDOWICZ, Krysia E., *et al*. *Op. cit.*, pp. 43-57

²² OLMO CABERO, Lucia del. *Estudio de la eficacia de tratamientos de consolidación de madera carbonizada de origen arqueológico*. Domènec Carbó, María Teresa (dir.), Trabajo Fin de Máster. Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universitat Politècnica de València, 2018, pp. 1-61

²³ *Íbidem*, pp. 1-61

²⁴ CULLEN COBB, Kim. *Op. cit.*, pp. 2-20

2. OBJETIVOS

La siguiente investigación tiene como principal finalidad determinar y comparar la eficacia de dos productos consolidantes, el Acril ME® y el Rexil®, aplicados mediante dos métodos distintos, por impregnación e inmersión, para la consolidación de madera carbonizada y de procedencia arqueológica.

Con el propósito de alcanzar este objetivo principal se plantean varios objetivos específicos:

- Determinar qué método de aplicación (por impregnación o inmersión) presenta una mayor eficacia para la consolidación del material.
- Evaluar los cambios de las características morfológicas y físico-mecánicas que experimentan las probetas tras la aplicación de los consolidantes.
- Evaluar el comportamiento frente a la consolidación de diferentes probetas de material lúneo carbonizado según sus propiedades físico-mecánicas.
- Cooperar con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, en concreto con la meta “**11.4** Redoblar los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo” dentro de las metas que plantea el objetivo “**11** Ciudades y comunidades sostenibles”²⁵. Por otro lado, a partir de la conservación del carbón vegetal arqueológico podemos estudiar los ecosistemas pasados y su evolución a lo largo de los años con el fin de conservar y restaurar los actuales ecosistemas. Por ello, contribuir con el objetivo “**15** Vida de ecosistemas terrestres” en específico la meta “**15.2** Para 2020, promover la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y la reforestación a nivel mundial”²⁶. Por consiguiente, también contribuir con el objetivo “**13** Acción por el clima” con el fin de comprender los efectos del cambio climático y así tomar medidas adecuadas para reducirlo (meta “**13.2** Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”²⁷). Por último, la conservación de este recurso vegetal revela las prácticas de uso y explotación a lo largo del tiempo, lo que puede servir en el presente para adoptar prácticas de producción y consumo más responsables. Por ello, podría contribuir con el objetivo “**12** Producción y consumo responsables” a través de la meta “**12.2** de lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales”²⁸.

²⁵ Objetivo 11.4 de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) Naciones Unidas. Ciudades - Desarrollo Sostenible (un.org)

²⁶ Objetivo 15.2 de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) Naciones Unidas. Bosques, desertificación y diversidad biológica (un.org)

²⁷ Objetivo 13.2 de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) Naciones Unidas. Cambio climático - Desarrollo Sostenible (un.org)

²⁸ Objetivo 12.2 de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) Naciones Unidas. Consumo y producción sostenibles - Desarrollo Sostenible (un.org)

3. METODOLOGÍA

Para la realización del siguiente trabajo ha sido de gran importancia la obtención de información por medio de diversos recursos técnicos, además de una gran variedad de libros, estudios científicos, artículos y páginas web recopiladas en el apartado de bibliografía. El trabajo se divide en dos partes distinguibles, la parte teórica y la parte experimental, posteriormente a partir de los datos obtenidos en la experimentación se ha realizado una interpretación y confrontación de los resultados; finalmente, de los resultados se han elaborado las conclusiones del trabajo.

En la Figura 3 se muestra un esquema de la metodología llevada a cabo en la siguiente investigación:

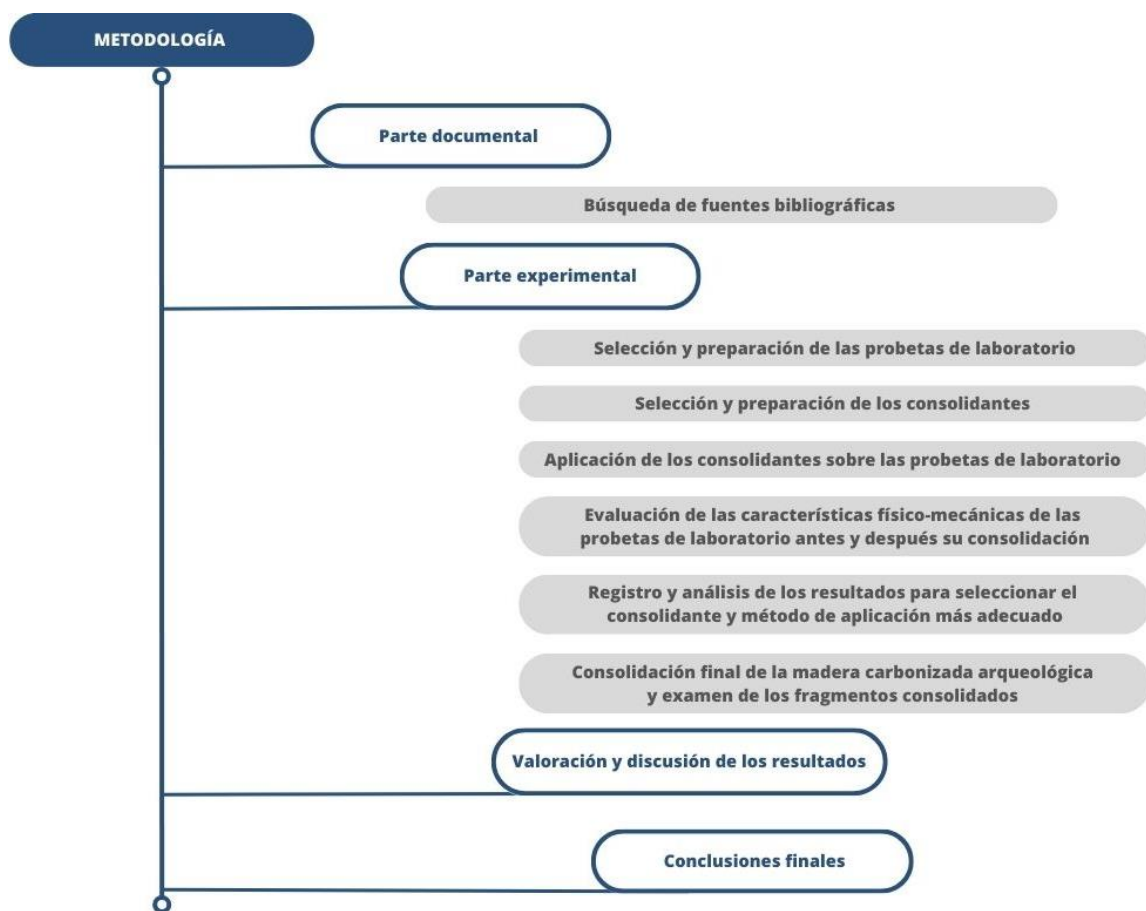


Fig. 3. Esquema de la metodología planteada para la realización del trabajo

La **parte documental** es la fase previa a la experimental, ya que ayuda a respaldar la investigación. Esta ha consistido en la recopilación de información adquirida por las fuentes bibliográficas, la cual se ha centrado en la búsqueda de investigaciones anteriores sobre el uso de productos para la consolidación de madera carbonizada arqueológica. No obstante, dada la escasa información que existe sobre el caso, se ha ampliado la búsqueda hacia consolidantes más novedosos empleados en la consolidación de materiales porosos.

La **parte experimental** del trabajo consiste en el diseño y desarrollo de una investigación experimental para evaluar la eficacia de los dos tratamientos consolidantes a ensayar. Esta, a su vez, se ha dividido en distintas fases:

- Selección y preparación de las probetas de laboratorio:
Elección de fragmentos de carbón vegetal carbonizado para la elaboración de probetas.
- Selección y preparación de los productos consolidantes:
Elección de los productos, metodologías de aplicación y proporciones más adecuados para la consolidación de la madera carbonizada a partir de la búsqueda bibliográfica realizada previamente y la preparación de las disoluciones.
- Aplicación de los consolidantes sobre las probetas de laboratorio.
- Evaluación de las características físico-mecánicas de las probetas de laboratorio:
Estudio previo y posterior a la aplicación de los consolidantes sobre las probetas. Las técnicas analíticas y ensayos empleados han consistido en: el estudio micromorfológico por microscopía óptica, estudio colorimétrico y medición del brillo, evaluación del comportamiento hídrico mediante el ensayo de absorción a la gota, determinación de la dureza superficial y evaluación de la profundidad de penetración del consolidante mediante análisis por espectroscopía ATR-FTIR.
- Registro de los datos y análisis de los resultados obtenidos para seleccionar el consolidante y método de aplicación más adecuado.
- Consolidación de la madera carbonizada arqueológica y examen de los fragmentos consolidados.

4. MATERIALES Y TÉCNICAS

4.1. Contextualización del carbón de procedencia arqueológica

SANTUARIO Y TERMAS ROMANAS DE MURA	
Año de edificación:	Finales del S. I, aprox.
Tipología:	Edificios dotacionales / Aseos públicos / Termas
Estilo:	Arquitectura clásica
Ubicación:	<i>Plaça de les Termes</i>
Declarado BIC:	No, BRL (Bien de relevancia local)

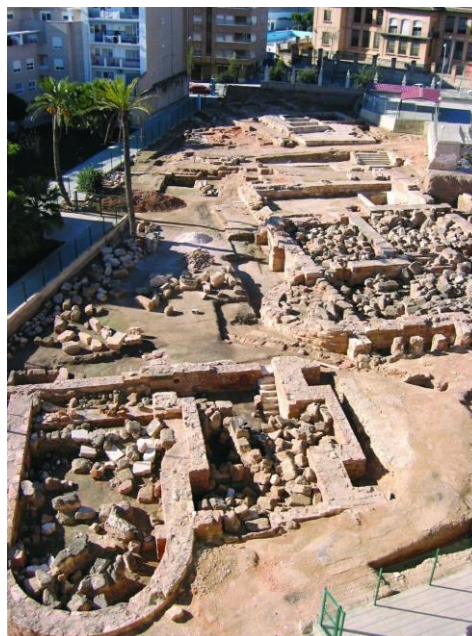


Fig. 4. Termas romanas de Mura.

Los carbones arqueológicos examinados proceden del yacimiento arqueológico de las termas y el santuario romano de la partida de Mura conocidas también como *Pla de l'Arc* (Figs. 4 y 5). Ubicadas en los restos de la antigua ciudad romana de Edeta y que actualmente conocemos como Lliria, datan de finales del siglo I d.C. Edeta estaba situada entre dos importantes enclaves romanos, la ciudad de Saguntum (Sagunto) y la colonia romana de Valentia, actual ciudad de Valencia.

En la ciudad de Edeta del siglo I, el senador romano Edetano Marcus Cornelius Nigrinus Curiatius Maternus, renombrado militar y aspirante a emperador de Roma, fue posiblemente el financiador de este conjunto monumental, el santuario oracular y las termas romanas de Mura.

La primera campaña arqueológica del yacimiento se inició en el 1971 por el servicio de Investigación Prehistórica de la Diputación Provincial de Valencia y la última intervención arquitectónica tuvo lugar en el año 2014. Se trata de un complejo termal de carácter público, religioso y curativo distribuido en un total de 3.600 m². El complejo polifuncional se distribuye en varios espacios: dos grandes edificios termales, un santuario oracular situado dentro de un espacio religioso con varios templos, dos mausoleos, complejos lúdicos y balnearios para hombres y mujeres, un hostel y otro tipo de establecimientos^{29,30}. De los edificios termales, las termas masculinas, eran las que ocupaban una mayor superficie de terreno siendo esta de 2.500 metros cuadrados. Estas siguen el modelo de termas-palestra característicos de las termas de finales del siglo I d.C. en la cual las termas discurren entorno al patio principal,

²⁹ ESTEBAN CHAPAPRÍA, Julià; MOLINER CANTOS, Elisa. “Estudios de arquitectura romana. Las termas mayores de Mura, Lliria (Valencia)”. *Papeles del Partal: revista de restauración monumental*. 2015, núm. 7. p. 87.

³⁰ TORMO, Santiago. “Las termas romanas de Mura en Lliria (Valencia). Un doble complejo termal y un santuario oracular único en la Hispania Citerior”. *Anales de Edificación*, Universidad Politécnica de Madrid, 2018, vol. 4, núm. 2. p.53

que es la palestra. Se preservan las tres salas de baño construidas siguiendo el estilo pompeyano: El *Apodyterium* (vestíbulo)/*frigidarium* (sala para el baño frío) /*destrictarium* (sala para unciones); el *tepidarium*, sala tibia y por último el *caldarium*, sala para el baño de agua caliente considerada la sala más importante de todas. Las termas pequeñas que presentan una distribución en forma de “L”, están constituidas por las mismas salas que las termas mayores además de una sala nueva, la piscina cálida similar a una piscina climatizada³¹.

Hasta la fecha han sido documentadas como las termas romanas más grandes halladas en el territorio peninsular y de las mejores conservadas de la Hispania Romana.

En el período romano bajo imperial las termas son abandonadas y ocupadas sucesivamente en la época bizantina y la visigoda, donde probablemente su función original cambiase y fuesen utilizadas como un monasterio cristiano. Finalmente son abandonadas definitivamente a mediados del siglo VII d.C³².

Este tipo de construcciones termales estaban preparadas para utilizar el fuego y el agua con un complejo mecanismo de calefacción mediante conductos y aperturas entre las paredes del recinto. De esta manera conseguían generar y transmitir la energía calorífica deseada por todo el espacio³³. Se calcula que para cumplir con la demanda energética requerida era necesario alimentar los hornos en su fase de encendido con una cantidad de 120Kg de madera por hora, una vez alcanzada la temperatura adecuada en las salas, ya solo se necesitaba realizar cargas de 60kg para su mantenimiento³⁴.



Fig. 5. Termas romanas de Mura.

³¹ ESCRIVÀ, Vicent. *Anuarios Culturales*, Archivado el 25 de septiembre de 2008. pp.261-262

³² ESCRIVÀ, Vicent. *Op. cit.*, p. 262

³³ TORMO, Santiago. *Op. cit.*, p.53

³⁴ *Ibidem*, p.60

4.2. Caracterización del material de estudio

El material de estudio corresponde a varios fragmentos de madera carbonizada procedentes de la excavación arqueológica de las Termas Romanas de Mura facilitados por el Museo Arqueológico de Llíria (MALL), (*Fig. 6*). Los restos carbonizados extraídos de la excavación fueron encontrados en la unidad estratigráfica (UE) 1023 del yacimiento y son el producto de la madera empleada como combustible para encender y alimentar los fuegos de los hornos de las termas. Se trata de madera de pino, género *Pinus* con lo cual pertenecen al orden de las coníferas. Los fragmentos presentan unas dimensiones muy variadas de entre 0'7 – 2 cm aproximadamente y una morfología irregular debido a su grado de carbonización la cual dificulta el reconocimiento de los cortes anatómicos de la madera.

El estado de conservación de los carbones es regular debido a la propia naturaleza pulverulenta del carbón. Presentan un elevado grado de descohesión y fragmentación lo que dificulta su manipulación y consecuentemente la experimentación. Asimismo, las dimensiones de los fragmentos limitan los ensayos a realizar, ya que por un lado la superficie es muy reducida y, por otro lado, su manipulación durante ciertas mediciones podría suponer la pérdida de material original. Por ello, se ha considerado conveniente realizar la experimentación sobre probetas para los ensayos de evaluación de las propiedades físico-mecánicas.

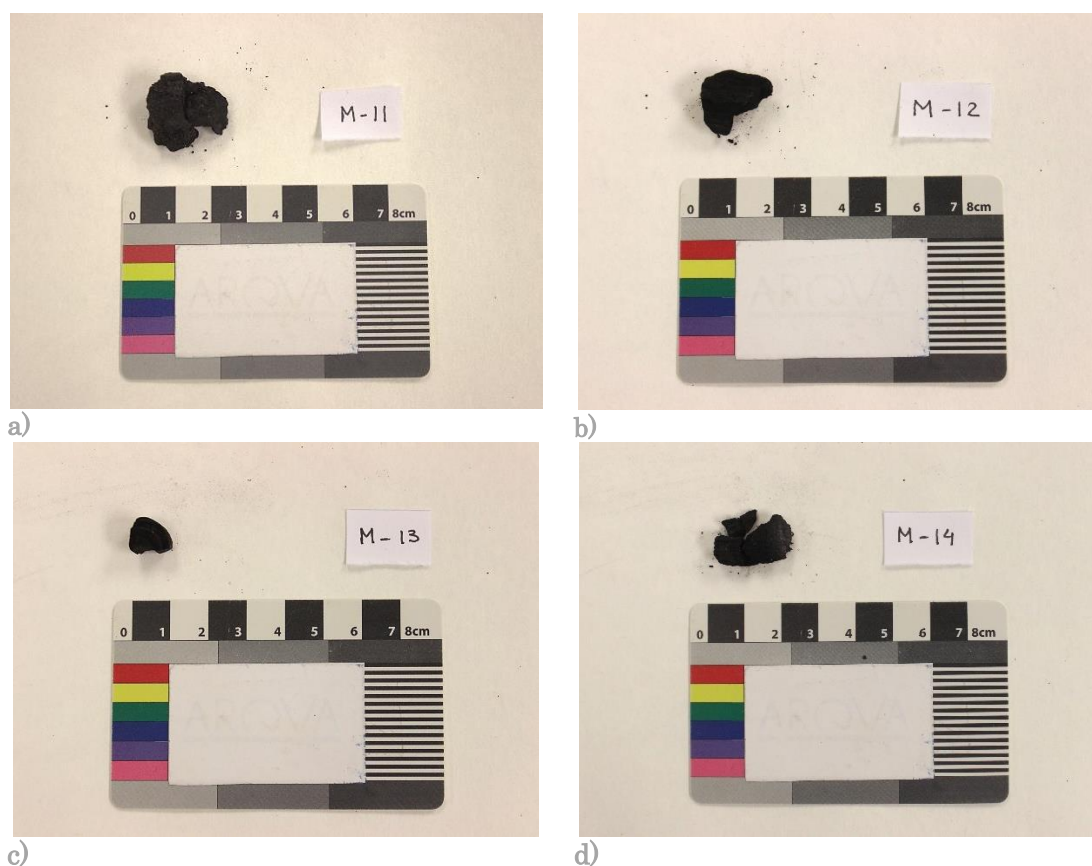


Fig. 6. Fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico procedentes del yacimiento de las Termas Romanas de Mura: a) M-11, b) M-12, c) M-13, d) M-14.

4.3. Preparación de las probetas de laboratorio

La experimentación se ha llevado a cabo a partir del uso de probetas lo más semejantes al material original. Una vez realizados los ensayos y el tratamiento y en función de los resultados obtenidos se aplicará aquel producto consolidante que haya dado mejores resultados sobre los restos de carbón arqueológico procedentes del yacimiento.

Para la obtención de las probetas han sido empleados fragmentos de carbón comercial de uso doméstico. Inicialmente se ha realizado una primera selección de los fragmentos que presentasen tamaños similares y adecuados para los ensayos a realizar. Seguidamente, se ha procedido a cortar aquellos carbones más grandes en fragmentos más pequeños mediante una sierra de mano para obtener fragmentos de medidas regulares (*Fig. 7*). Los fragmentos presentan unas dimensiones de 3 a 6 cm aproximadamente.

Para la identificación de la madera se ha procedido a preparar láminas finas del plano anatómico transversal de los fragmentos, las cuales han sido observadas bajo luz transmitida en un microscopio estereoscópico.

En los cortes transversales obtenidos para los carbones pueden observarse los poros de la madera agrupados y de tamaños similares (*Fig. 8*). Se trata entonces de madera frondosa pues se caracterizan por los poros a diferencia de las coníferas las cuales carecen de ellos.

Inicialmente se prepararon 16 probetas sobre las que se evaluaron el color, brillo, dureza y comportamiento hídrico. Las pruebas previas revelaron valores muy dispersos en cuanto al tiempo de absorción de la gota y dureza Shore D. Analizando estos resultados, se llegó a la conclusión de que teniendo las probetas unas características tan desiguales, la interpretación sobre la eficacia del consolidante no dependería tan solo del comportamiento intrínseco del tratamiento, sino principalmente del nivel de degradación del material derivado del grado de carbonización de la estructura de la propia madera. Por ello, y con el fin de obtener resultados fiables y reproducibles, se procedió a realizar una clasificación del material para poder trabajar con fragmentos que presentaran unas características más homogéneas. En la Figura 9 se puede observar el aspecto general de las probetas sometidas a estudio.



Fig. 7. Proceso de preparación de las muestras cortándolas mediante una sierra de mano.



Fig. 8. Vista del corte transversal a X2.0 aumentos en madera frondosa.

Consecuentemente, se optó por dividir 12 de las muestras seleccionadas en dos series, aquellas que presentaban tiempos de absorción de la gota más cortos (de 1 – 12 min.) y que presentaban una menor dureza, y un segundo grupo constituido por aquellas probetas cuya absorción de la gota era más lenta (de alrededor de 1 hora) y presentaban unos niveles de dureza mayores (*Tabla 1*).

Tabla 1. Nomenclatura final según los valores de dureza y el tiempo de absorción de la gota de las probetas: **R**=Rexil/**A**=Acril *ME* // **P**=Probeta // **1**=1 Mano/**2**=2 Manos/**3**=Inmersión // **A**=Maderas menos duras/**B**=Maderas más duras.

NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS DE LABORATORIO	Características físico-mecánicas	Tiempo absorción de la gota (min.)	Dureza Shore	Consolidante	Método de aplicación	Nombre
	MADERA MENOS DURA / MÁS ABSORVENTE	1 – 12 min.	15 – 17	REXIL®	Impregnación 1 aplicación	R-P-1A
					Impregnación 2 aplicaciones	R-P-2A
					Inmersión	R-P-3A
				ACRIL ME®	Impregnación 1 aplicación	A-P-1A
					Impregnación 2 aplicaciones	A-P-2A
					Inmersión	A-P-3A
	MADERA MÁS DURA / MENOS ABSORVENTE	48 – 60 min.	26,5 – 39,6	REXIL®	Impregnación 1 aplicación	R-P-1B
					Impregnación 2 aplicaciones	R-P-2B
					Inmersión	R-P-3B
				ACRIL ME®	Impregnación 1 aplicación	A-P-1B
					Impregnación 2 aplicaciones	A-P-2B
Inmersión					A-P-3B	

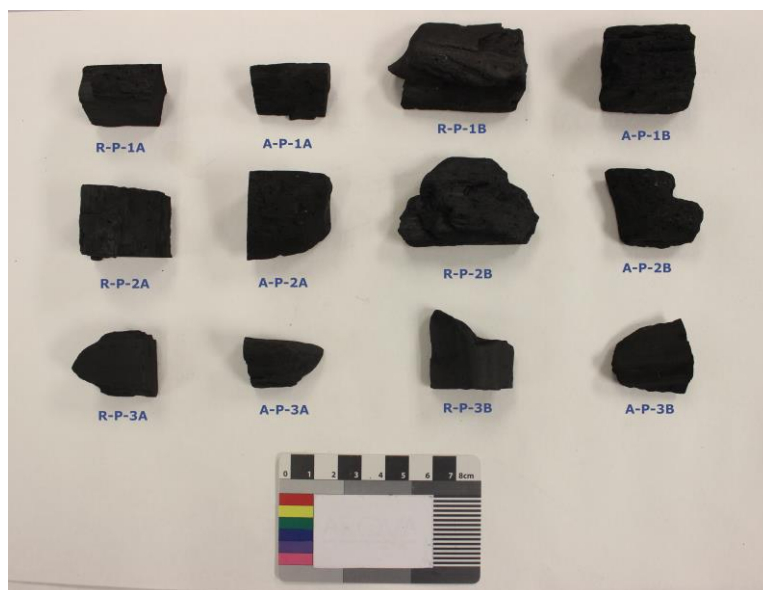


Fig. 9. Imagen de las probetas con su perteneciente nomenclatura

A continuación, se describen los ensayos y análisis llevados a cabo en las probetas de laboratorio y en las muestras de carbón vegetal arqueológico (*Tabla 2*).

Tabla 2. Análisis y ensayos realizados en cada tipo de fragmento de madera carbonizada.

TIPO DE MUESTRA	PROBETAS DE LABORATORIO	CARBÓN DE PROCEDENCIA ARQUEOLÓGICA
ENSAYOS Y ANÁLISIS REALIZADOS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Microscopía óptica ▪ Ensayos mecánicos ▪ Evaluación del comportamiento hídrico ▪ Estudio colorimétrico ▪ Estudio del brillo ▪ Espectroscopía ATR-FTIR 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Microscopía óptica ▪ Evaluación del comportamiento hídrico

4.4. Los consolidantes

4.4.1. Estudio de las propiedades de los productos consolidantes

La consolidación tiene como objetivo incrementar la fuerza cohesiva del material deteriorado, y esta tiene efectos mecánicos, químicos y ópticos, los cuales serán evaluados en la experimentación. Tener un conocimiento previo sobre las características y el comportamiento de los consolidantes posibilita acometer una selección óptima de su uso. Los requerimientos de un consolidante son una alta capacidad de penetración, cualidades adhesivas y cohesivas para la estructura deteriorada del material y que permanezca de forma estable en la madera. A pesar de que se emplean consolidantes reversibles, la mayor parte del proceso de consolidación es irreversible ya que el producto se adhiere al material por medio de enlaces intermoleculares terminando por formar parte del objeto³⁵.

La selección de los consolidantes se ha realizado a partir de una previa búsqueda bibliográfica sobre productos empleados para la consolidación de madera carbonizada, madera en estado sin carbonizar y otros materiales orgánicos.

En esta investigación, se ha valorado la elección de consolidantes más actuales para el tratamiento de los carbones. En lugar de recurrir a los tratamientos de consolidación más tradicionales como es el caso del Paraloid® B-72, se han propuesto dos productos más novedosos: una resina alifática, el Rexil® y una microemulsión acrílica, el Acril ME®. Se ha seleccionado el Rexil® como propuesta de estudio en esta experimentación debido a su amplio uso en la consolidación de madera donde ha demostrado ofrecer resultados muy satisfactorios³⁶. En el caso del Acril ME® su elección se ha basado en los resultados obtenidos del trabajo de final de máster de Javier Fernández³⁷, en los cuales una proporción del 5% de este consolidante en agua desmineralizada proporcionaba óptimos resultados sobre soporte óseo arqueológico.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la investigación realizada por Lucía del Olmo Cabero en su tesina de final de máster sobre el *Estudio de la eficacia de tratamientos de consolidación de madera carbonizada de origen arqueológico*³⁸ se han seleccionado consolidantes de diferente naturaleza a los de su caso de estudio con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los consolidantes más efectivos, para así obtener una visión más amplia de la eficacia de diferentes tipos de consolidantes para el carbón vegetal arqueológico.

A continuación, se describirán las principales características de los dos tratamientos seleccionados para este estudio:

³⁵ HORIE, Velson. *Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings*, New York: Routledge, 2010. p. 106.

³⁶ PIENA, Hans, "Regalrez in Furniture Conservation". *Journal of American Institute for Conservation*, 2001, vol. 40, núm 1. pp.59-68

³⁷ FERNANDEZ MARTÍNEZ, Javier. *Eficacia de la consolidación de material óseo arqueológico húmedo*. Carrascosa Moliner, Begoña (dir.); Osete Cortina, Laura (dir.), Trabajo Fin de Máster. Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universitat Politècnica de València, 2022, pp. 1-92

³⁸ OLMO CABERO, Lucía del. *Op. cit.*, pp. 1-61

Rexil®

Es una resina alifática a base de Regalrez® 1126 empleada en la consolidación de madera. El Rexil® presenta una baja viscosidad debido a su bajo peso molecular, lo cual le permite alcanzar unos niveles de penetración mayores que con otras resinas de tipo acrílico o de tipo poliuretanos. Para lograr una buena penetración de la resina esta debe diluirse siempre en *White Spirit* D40 u otros disolventes de baja o media polaridad. Según las recomendaciones que ofrece la empresa CTS® en la ficha técnica del producto, el Rexil® debe diluirse al menos 1:1 en peso o volumen³⁹. Según el fabricante, esta resina, además, confiere un efecto protector frente al ataque de microorganismos.

Acril ME®

Es una microemulsión acrílica en dispersión acuosa con un tamaño de partícula reducido en comparación con las clásicas emulsiones/dispersiones como el Acril 33. Debido a su tamaño reducido de la partícula presenta una menor viscosidad, lo que le permite alcanzar unos niveles óptimos de penetración. Se emplea en la consolidación de materiales porosos descohesionados y en la fijación de estratos pictóricos. Para favorecer su penetración puede diluirse en agua desmineralizada, aunque puede diluirse también en alcohol⁴⁰. En el caso del producto Acril ME®, y considerando los resultados obtenidos en la investigación realizada por Javier Fernández en su tesina de final de máster, se optó por emplear una concentración del 5% del producto en agua desmineralizada⁴¹.

4.4.2. Preparación de los consolidantes

La preparación de los consolidantes se ha realizado bajo una campana de extracción de gases ya que se ha empleado el uso de disolventes.

Para la preparación del producto consolidante **Rexil®** se ha empleado como diluyente el *White Spirit* de la casa Aldrich® en proporción 1:1, siguiendo las recomendaciones que indica la marca CTS® (*Fig. 10*).



Fig. 10. Productos y materiales empleados para la preparación del consolidante Rexil.

³⁹ Ficha técnica del producto Rexil de CTS®

⁴⁰ Ficha técnica del producto Acril ME de CTS®.

⁴¹ FERNANDEZ MARTÍNEZ, Javier. *Op. cit.*, pp. 1-92

Para la preparación del producto consolidante **Acril ME®** se ha empleado como diluyente agua desmineralizada y se ha realizado una disolución a una concentración del 5 % en volumen (*Fig. 11*).



Fig. 11. Productos y materiales empleados para la preparación del consolidante Acril ME.

4.5. Consolidación de las probetas

Para el proceso de consolidación de las probetas se han empleado dos métodos de aplicación distintos, mediante impregnación con pincel e inmersión.

4.5.1. Consolidación mediante impregnación

La impregnación ha consistido en la aplicación del producto consolidante mediante una brocha plana de cerdas sintéticas sobre una de las caras de cada probeta (*Fig. 12*). Para ello se han seleccionado las caras exteriores de la madera, evitando los cortes frescos.

El proceso de impregnación se ha realizado de dos maneras (*Tabla 3*), cuatro de las probetas han sido impregnadas mediante una aplicación y cuatro han sido impregnadas mediante dos aplicaciones. La aplicación en ambos casos se ha realizado en forma de cruz, es decir, una primera pasada en el sentido de las fibras y la siguiente perpendicular a esta.



Fig. 12. Aplicación del consolidante sobre el fragmento mediante pincel

Una vez terminado el proceso se han dejado las probetas para su secado natural durante un periodo de 3 semanas en condiciones de laboratorio (20°C y 50% H.R) hasta su caracterización final.

4.5.2. Consolidación mediante inmersión

La inmersión en el consolidante ha consistido en la introducción de las probetas en envases con las disoluciones correspondientes. Para ello se prepararon 4 envases, uno por cada probeta a consolidar (*Fig. 13*).

Para la consolidación por inmersión se han empleado las mismas proporciones de los productos que en la impregnación. El proceso ha consistido en la inmersión de los fragmentos en cada uno de los recipientes durante un tiempo de actuación de 1 hora. Previamente, se impregnaron las probetas con el solvente de las disoluciones mediante una muñequilla de algodón y gasa hidrófila, con el fin de favorecer la penetración del consolidante en el material. Durante este tiempo de inmersión, los recipientes permanecieron cerrados herméticamente

mediante una tapa de espuma de polietileno cortada según la forma del vaso. Asimismo, se elaboró un sistema de fijación mediante palillos de madera en el interior de los recipientes para lograr que el carbón quedará sumergido en el consolidante sin llegar a reposar sobre la base.



Fig. 13. Envases con los fragmentos sumergidos

Tras una hora de inmersión se retiraron las probetas de los vasos y posteriormente fueron depositadas sobre una superficie de vidrio para su secado natural. En la Figura 14 se puede observar el aspecto final de las probetas tras su consolidación.



Fig. 14. Imagen de todas las probetas consolidadas

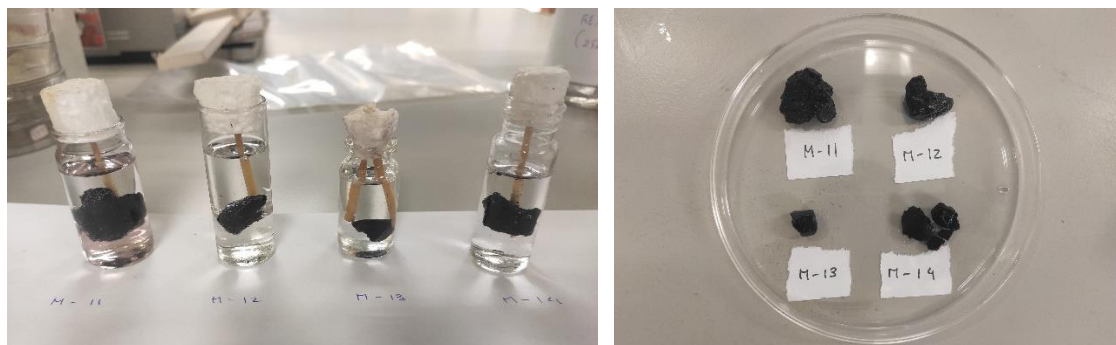
Tabla 3. Resumen sobre los tratamientos de consolidación.

Producto consolidante	Disolvente/ diluyente	Modo de aplicación	Concentración
Rexil®	White Spirit	Impregnación (una y dos aplicaciones) e inmersión	1:1
Acril ME®	Agua desmineralizada	Impregnación (una y dos aplicaciones) e inmersión	5%

4.6. Consolidación de las muestras de carbón vegetal de procedencia arqueológica

Una vez terminados los ensayos sobre las probetas de carbón comercial se llevó a cabo la valoración y discusión en base a los resultados extraídos. Estos se exponen en el apartado de resultados y discusión del trabajo (Apartado 5. *Resultados y discusión*). El método de aplicación que resultó ser el más eficaz en cuanto a lograr una mayor penetración en las probetas fue la inmersión mientras que, el producto consolidante que ha proporcionado mejores resultados en cuanto al grado de penetración, y refuerzo de la estructura ha sido el Rexil®. Por todo ello, esta fue la metodología de aplicación y el tratamiento empleado para el material arqueológico estudiado.

Para la consolidación de las muestras arqueológicas se ha seguido la misma metodología que en el caso de las probetas, empleando en este caso el Rexil® en proporción 1:1 en *White Spirit* preparado en cuatro recipientes cerrados mediante una tapa de porexpán® cortada a medida (Fig. 15). Al igual que para las probetas, los carbones se impregnaron previamente con la solución con una muñequilla de algodón y gasa hidrófila para favorecer la penetración del producto. Acto seguido, las muestras permanecieron en inmersión a lo largo de una hora. Posteriormente, se sacaron de los recipientes y se dejaron secar sobre una Placa Petri (Fig. 16).



Figs. 15 y 16. Imágenes del proceso de consolidación por inmersión de los fragmentos de carbón arqueológico

4.7. Técnicas de análisis, ensayos e instrumental para la caracterización e identificación de la madera carbonizada

Las probetas de carbón se sometieron a una serie de análisis y ensayos con el fin de caracterizarlos desde el punto de vista morfológico, químico-mineralógico y físico-mecánico. En la siguiente tabla (*Tabla 4*) se detallan los ensayos y análisis empleados.

Tabla 4. Resumen de los análisis y ensayos realizados para la caracterización de las probetas.

Caracterización morfológica	Caracterización químico-mineralógica	Caracterización óptica	Caracterización físico-mecánica
Microscopía óptica	Espectroscopía ATR-FTIR	Estudio colorimétrico Estudio del brillo	Dureza superficial Comportamiento hídrico

A continuación, se describe el equipamiento empleado para cada uno de los análisis y ensayos realizados:

4.7.1. Caracterización morfológica por microscopía óptica

Para la identificación de las maderas y el estudio morfológico de las probetas antes y después de su consolidación se ha utilizado un microscopio estereoscópico Leica S8 APO (10X-80X) con una iluminación externa por fibra óptica. Las imágenes han sido adquiridas desde una cámara digital Leica DMC6200 incorporada al microscopio y su procesado se ha realizado mediante el software *Leica Application Suite 4.12*. Las imágenes han sido adquiridas previamente a la aplicación de los consolidantes en los fragmentos y una vez tras ser aplicados para determinar los posibles cambios en la superficie del material (*Fig. 17*).

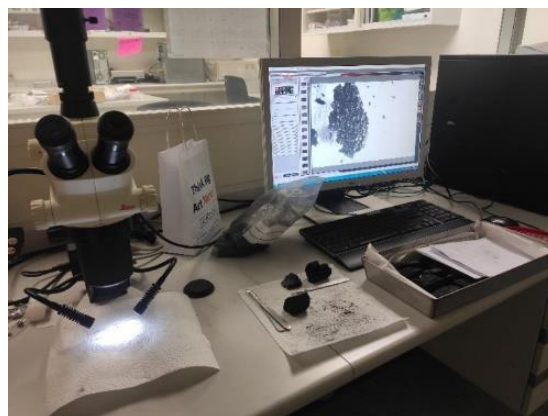


Fig. 17. Imagen del proceso de obtención de imágenes mediante microscopía óptica en el laboratorio de análisis fisicoquímico del IRP, Universidad Politécnica de Valencia

4.7.2. Medición del brillo

Para el estudio sobre la variación del brillo se ha utilizado un medidor de brillo Multi Gloss 268 A de KONICA MINOLTAR®. Se trata de un medidor portátil compacto que cuenta con tres geometrías del reflectómetro de 20°, 60° y 85° y que tiene conformidad con la norma ISO 2813 ⁴².

A través de la ventana de medición se ha colocado el instrumento asegurando su contacto sobre la superficie de la probeta y se ha procedido a tomar 5 mediciones para cada una de ellas. En las Figuras 18 y 19 se observa el equipo de medida y un detalle de una de las mediciones realizadas.



Figs. 18 y 19. Multi Gloss 268 A. Brillómetro Multi Gloss 268 Plus.

4.7.3. Estudio colorimétrico

Para el estudio de variaciones cromáticas realizado sobre la superficie de las probetas antes y después de la consolidación, se ha empleado un Espectrofotómetro CM-2000d de KONICA MINOLTAR® (*Fig. 20*) instrumento que permite la medición del color de un objeto. Las condiciones de medidas de iluminante empleadas han sido el estándar CIE D₆₅ y observador estándar 10°. Las mediciones se han tomado con componente especular incluida (SCI) y componente especular excluido (SCE).

El sistema de medición CIE (1976), espacios de color (L* a* b*), también conocido como CIELAB, define tres coordenadas cartesianas en las cuales el valor L* expresa la luminosidad (claro u oscuro) y las coordenadas del color se expresan a través de los parámetros a* y b*^{43,44}. El valor a* indica la tendencia hacia las coordenadas del color rojo/verde, mientras

⁴² KONICA MINOLTA. *Multi Gloss 268 Plus*.

⁴³ ALONSO FELIPE, José Vicente. *Taller sobre el color y su medición*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2019. p.21

⁴⁴ DOMÉNECH CARBÓ, M.T., *Análisis químico y examen científico de patrimonio cultural*. Madrid: Síntesis, 2018. pp. 240-241

que el valor b^* indica la coordenada de amarillo/azul. La determinación de estos parámetros permite caracterizar de manera objetiva el color y luminosidad que presenta un objeto.

Para la realización del estudio colorimétrico se han tomado cinco mediciones por cada una de las probetas sobre áreas de la superficie representativas. Se ha dispuesto el instrumento sobre cada una de las probetas asegurando que la ventana de medición estuviera en contacto sobre la superficie del material. Para la realización de este ensayo se ha seguido la normativa UNE-EN 15886:2011. Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies en lo que respecta a proceso de medida y número de mediciones⁴⁵.



Fig. 20. Proceso de toma de datos mediante el Espectrofotómetro CM-2000d de KONICA MINOLTAR®

4.7.4. Evaluación de las propiedades mecánicas: Dureza Shore D

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de las probetas se ha realizado el ensayo de dureza Shore empleando un Durómetro Digital Shore D con un rango de medición de 0-100 HD y una resolución de 0.5 HD estándar. La escala Shore D es un método que se utiliza para medir la dureza en los materiales considerados más duros o rígidos. El nivel de la dureza se determina a partir de la penetración de la aguja del durómetro sobre la superficie de la muestra.

Para el ensayo se han tomado cinco mediciones por probeta y posteriormente de los valores registrados se ha calculado el valor promedio. Este mismo ensayo se realizó una vez aplicado el consolidante para comprobar el efecto producido por el tratamiento respecto a las propiedades mecánicas y la integridad del material. En las Figuras 21 y 22 se observa el equipo de medida y un detalle de una de las mediciones realizadas.



Fig. 21. Durómetro empleado



Fig. 22. Proceso de obtención de los valores de dureza de las probetas

⁴⁵ Normativa UNE-EN 15886:2011 *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies*, 2011

4.7.5. Evaluación del comportamiento hídrico: ensayo de la absorción de la gota

Para la evaluación del comportamiento hídrico del material se ha realizado el ensayo de absorción de la gota sobre las probetas antes y después de su consolidación. La finalidad de este ensayo es la de determinar la capacidad de absorción de un material poroso para poder evaluar como se ve alterada su porosidad con la aplicación del tratamiento consolidante. Para la realización del ensayo se ha empleado una Micropipeta de volumen variable monocanal Eppendorf research® plus⁴⁶ para transferir la cantidad de líquido precisada sobre las probetas (*Fig. 23*). En cada una de las probetas se ha realizado 3 mediciones seleccionando aquellas zonas más representativas. Sobre la superficie de una de las caras del carbón se han dispensado tres gotas de agua destilada de 10 μ L (*Fig. 24*).



Fig. 23. Instrumento Micropipeta Eppendorf research® plus

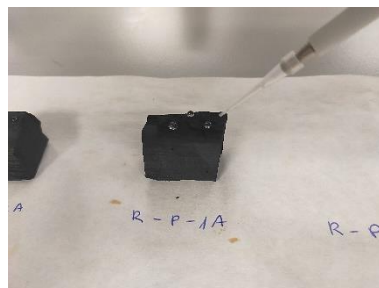


Fig. 24. Aplicación de las gotas de agua destilada sobre la superficie de las probetas.

4.7.5.1. Evaluación del comportamiento hídrico de los carbones arqueológicos

Para el ensayo de absorción de la gota se requiere que los materiales estén dispuestos en plano para evitar el deslizamiento de la gota de agua durante el ensayo. Para ello y debido a la irregularidad de los fragmentos de carbón arqueológico, estos han sido dispuestos en una cama de gel de sílice con una capa intermedia de *film* transparente para evitar el contacto directo con el material original (*Fig. 25*).



Fig. 25. Montaje para la realización del ensayo de absorción sobre los fragmentos de carbón arqueológicos

⁴⁶ Eppendorf Liquid Handling Operating manual Research plus [en línea]. Germany: Eppendorf AG, 2019 [Consulta: 29/03/2023]. Disponible en: https://www.eppendorf.com/product-media/doc/es/174967/Eppendorf_Liquid-Handling_Operating-manual_Research-plus.pdf



Fig. 26. Secado de las muestras en estufa de laboratorio

Tras el ensayo, los fragmentos se sometieron a secado en estufa a una temperatura de 60°C durante 12 h (ver *Fig. 26*) con el fin de que el material estuviera seco para su consolidación.

4.7.6. Análisis químico mediante Espectroscopía ATR-FTIR

Para la determinación de la capacidad de penetración de los productos consolidantes aplicados y su distribución en la estructura de los carbones, se ha llevado a cabo su análisis mediante Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (Espectroscopía ATR-FTIR). Se trata de una técnica de análisis ampliamente empleada en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural, que permite la identificación de materia tanto orgánica como inorgánica⁴⁷.

Se empleó un equipo Vertex 70 de Bruker Optics (*Figs. 27 y 28*) con un sistema de reflexión total atenuada (ATR), con un detector y recubrimiento para estabilización de temperatura FR-DTGS y con una resolución de 4 cm⁻¹ ⁴⁸.

La Espectroscopía FTIR emplea la energía del infrarrojo medio para el análisis de compuestos químicos estudiando el enlace vibratorio de sus moléculas. Cuando la energía IR interacciona con la muestra, los compuestos presentes en esta absorben en distintas longitudes de onda cambiando la vibración de sus enlaces a estados excitados. Como resultado, el detector registra en forma de espectro IR la absorción de esta energía a determinados valores de frecuencia que permite la identificación de los compuestos presentes en la muestra⁴⁹.

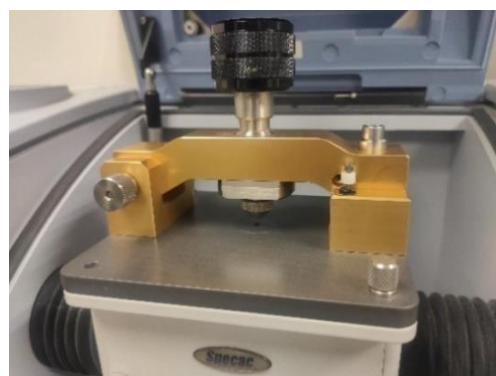
El sistema de reflectancia total atenuada (ATR) permite el análisis de materiales sólidos sin necesidad de tratamiento previo y a partir de muy poca cantidad de la muestra. El haz infrarrojo incide sobre un cristal de alto índice de refracción a un ángulo determinado. La reflectancia genera una onda evanescente que entra en contacto con la muestra y se atenuará en las regiones del espectro IR donde la energía será absorbida por la muestra.

⁴⁷ DOMÉNECH CARBÓ, María Teresa. *Análisis químico y examen científico de patrimonio cultural*. 2018, pp.207-214

⁴⁸ *Espectrómetro Vertex 70* [en línea] IRP-UPV, 2018. [Consulta: 18-04-2023]. Disponible en: <https://irp.webs.upv.es/es/espectrometro-vertex/>

⁴⁹ *Espectroscopía FTIR* [en línea]. Mettler Toledo [Consulta: 18-04-2023]. Disponible en: https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy.html

Posteriormente, el haz se dirige al extremo opuesto del cristal hasta llegar al detector el cual lo registra como una señal del interferograma, de la cual se obtiene el espectro de IR⁵⁰.



Figs. 27 y 28. Equipo de Espectroscopía ATR-FTIR Vertex 70 del laboratorio de análisis fisicoquímico del IRP, Universidad Politécnica de Valencia

El análisis mediante esta técnica se ha realizado para aquellas probetas que ofrecieron los mejores resultados en cuanto a dureza y comportamiento hídrico tras la consolidación.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el análisis sobre el nivel de profundidad de penetración se ha llevado a cabo sobre las 4 probetas que han sido sometidas al tratamiento por inmersión en ambos consolidantes para las dos tipologías de madera. Para la realización del análisis se han tomado 6 muestras a distintas profundidades 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 cm, extraídas mediante bisturí y mediante un microscopio estereoscópico (*Fig. 29*).



Fig. 29. Muestras extraídas de cada probeta de 0 a 1 cm de profundidad

Posteriormente, estas muestras pulverizadas han sido depositadas sobre la ventana de medición del instrumento donde han sido analizadas. A partir del software se obtienen los correspondientes espectros infrarrojos.

⁵⁰ *Técnicas de muestreo de FTIR: Reflectancia total atenuada (ATR)* [en línea]. Thermo Fisher Scientific [Consulta: 26-04-2023]. Disponible en: *Técnicas de muestreo de FTIR: Reflectancia total atenuada (ATR)* | Thermo Fisher Scientific – ES.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se describen los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos y análisis llevados a cabo sobre el material de estudio, realizados antes y después del tratamiento de consolidación con el fin de obtener una visión comparativa respecto al comportamiento del consolidante en las probetas y así determinar aquel producto y método más idóneo.

5.1. Estudio micromorfológico mediante microscopía óptica

Las imágenes digitalizadas obtenidas mediante microscopía óptica nos proporcionan información sobre los posibles cambios en el color, el brillo y la textura de la superficie del material, además de información morfológica la cual permite reconocer elementos anatómicos característicos de las maderas y de sus alteraciones superficiales. A continuación, se muestran las imágenes más representativas adquiridas de la superficie de las probetas antes y después del tratamiento de consolidación para comparar las posibles variaciones.

Debido a que los carbonos no presentan planos regulares, en las imágenes se aprecia un relieve muy heterogéneo y ciertas fisuras asociadas al propio proceso de carbonización de la madera.

Del estudio morfológico realizado para las series R-P-1A, R-P-2A y R-P-3A (*Figs. 30-35*) se aprecia que la aplicación del tratamiento consolidante no produce un incremento notorio del brillo en el material tras la aplicación del consolidante Rexil®.

R-P-1A



Fig. 30. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 31. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

R-P-2A

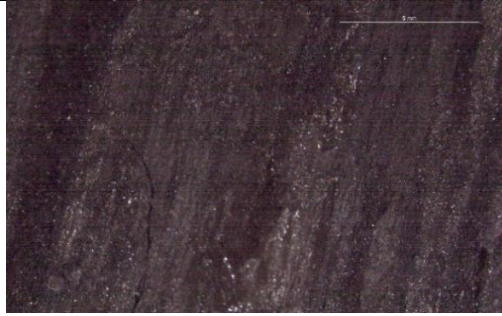


Fig. 32. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)

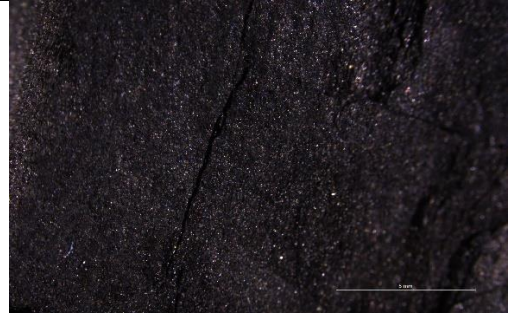


Fig. 33. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

R-P-3A



Fig. 34. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 35. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

Las probetas consolidadas con el producto Acril ME® (Figs. 36-41) apenas muestran algún cambio perceptible respecto al brillo, a excepción de la probeta A-P-2A (Fig. 39), la cual fue consolidada mediante impregnación a dos aplicaciones, y que exhibe una superficie ligeramente brillante tras la consolidación.

A-P-1A



Fig. 36. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 37. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

A-P-2A



Fig. 38. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)

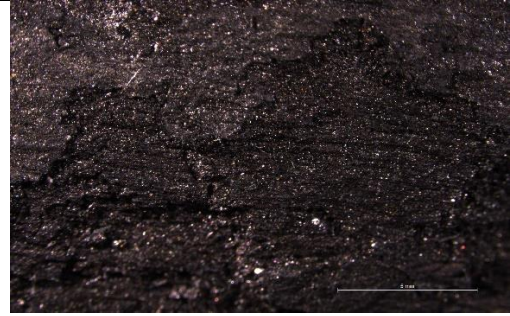


Fig. 39. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

A-P-3A



Fig. 40. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 41. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

Observando las imágenes de las series R-P-1B, R-P-2B y R-P3B (Figs. 42-47) se percibe un ligero incremento del brillo tras su consolidación, y en el caso de la probeta R-P-2B donde se habían realizado dos aplicaciones del consolidante Rexil® sobre la superficie, el aumento es más evidente.

R-P-1B

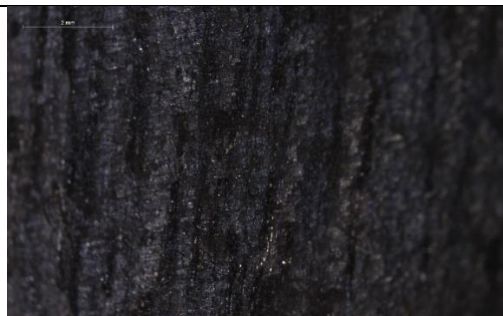


Fig. 42. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 43. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (20X)

R-P-2B



Fig. 44. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 45. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (16X)

R-P-3B



Fig. 46. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 47. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

Las probetas consolidadas con la formulación de Acril ME® (Figs. 48-53) muestran un significativo incremento del brillo apreciable en las microfotografías de la superficie de los fragmentos. Este aumento del brillo es más señalado en el caso de la probeta A-P-2B la cual fue consolidada mediante impregnación mediante dos aplicaciones.

A-P-1B



Fig. 48. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 49. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

A-P-2B



Fig. 50. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)



Fig. 51. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X)

A-P-3B



Fig. 52. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X)

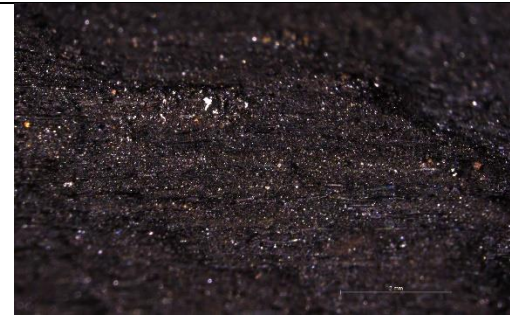


Fig. 53. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (20X)

En general, los cambios no difieren del tipo de madera según sus características físico-mecánicas. Sin embargo, según el método de aplicación, se ha detectado un destacable incremento del brillo el cual ha sido más evidente en la superficie de las probetas donde se han realizado dos aplicaciones del consolidante Acril ME®. En general, para la mayor parte de las probetas, los cambios no se consideran significativos ya que no son apreciables al ojo humano.

5.2. Evaluación de las características ópticas

5.2.1. Colorimetría

La evaluación de las características ópticas a partir del estudio colorimétrico permite determinar si se ha modificado el aspecto visual del material a nivel cromático. Los cambios perceptibles por el ojo humano se consideran cuando el cambio es de hasta cuatro unidades⁵¹. Las siguientes gráficas corresponden a una representación de las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* promedio obtenidas de las mediciones registradas sobre las probetas realizadas antes y después del tratamiento de consolidación.

En la siguiente gráfica (*Fig. 54*) se expresan las variaciones experimentadas por las probetas de madera blanda. En cuanto a la luminosidad (L^*), tanto una aplicación como dos del consolidante Acril ME® supone el oscurecimiento de la superficie del material. Respecto al color, la coordenada b^* varía ligeramente, excepto en la probeta consolidada mediante inmersión (A-P-3A), la cual ha experimentado un incremento significativo hacia el componente cromático amarillo superando las 4 unidades de diferencia respecto al valor registrado antes de la consolidación.

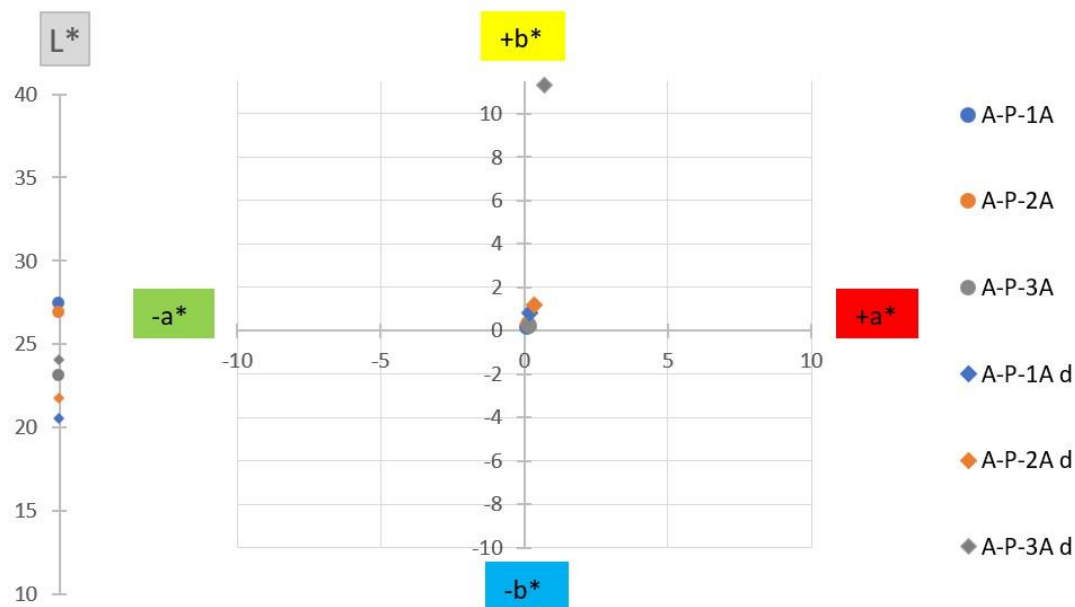


Fig. 54. Gráfico L^* , a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera blanda por impregnación e inmersión.

En la Figura 55 se representan los resultados obtenidos de las probetas de madera blanda consolidadas mediante el tratamiento Rexil®. Respecto a la luminosidad (L^*), el Rexil® tiende a producir un aumento de la luminosidad de las probetas. A nivel cromático se observan comportamientos similares, en todas las probetas varía la coordenada b^* suponiendo la disminución del componente cromático amarillo. Esta variación es más significativa en la probeta tratada con una sola aplicación por impregnación a pincel (R-P-1A).

⁵¹ BIEDMA GONZÁLEZ, Macarena. *Discriminación visual del color*. Heredia Mira, Francisco José (dir.). Trabajo Final de Grado. Grado en Óptica y Optometría, Universidad de Sevilla, 2020, p. 36

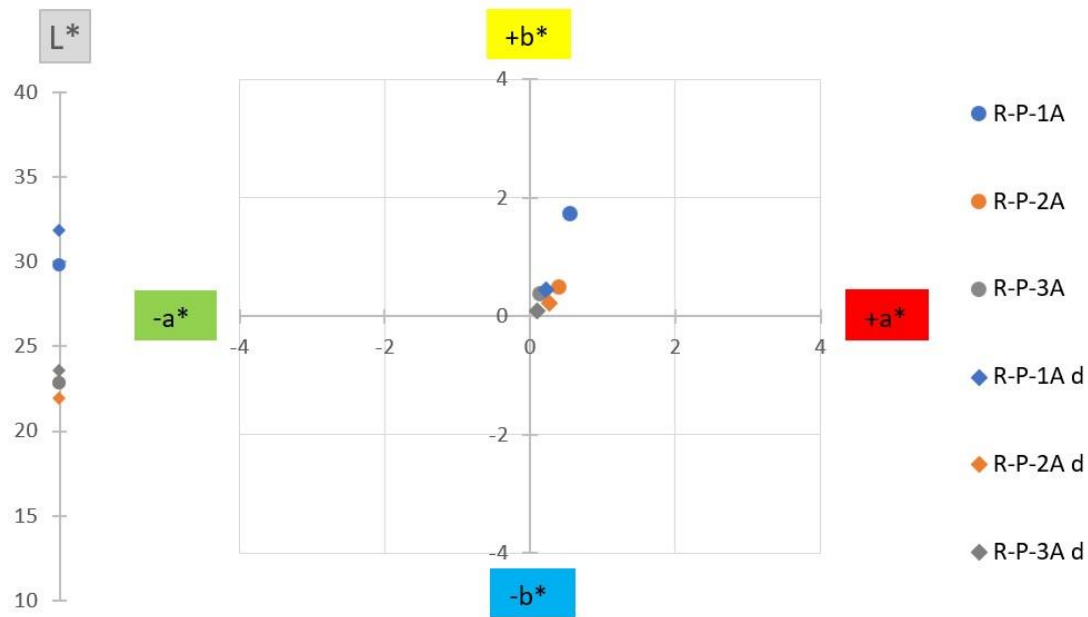


Fig. 55. Gráfico L^ , a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera blanda por impregnación e inmersión.*

En la siguiente gráfica (*Fig. 56*) se representan las variaciones experimentadas por las probetas de madera dura. En lo que respecta a los cambios de luminosidad (L^*) el Acril ME® ha producido en todas las probetas un oscurecimiento, que es más acusado en las probetas donde la aplicación del consolidante ha sido por impregnación a dos manos e inmersión. A nivel cromático, el cambio más significativo lo presenta la probeta consolidada por impregnación a pincel a dos manos (A-P-2B), la cual experimenta un ligero incremento de la coordenada b^* (amarilleamiento), sin embargo, el ascenso apenas llega a dos unidades. Estos resultados indican que las diferencias a nivel cromático son reducidas.

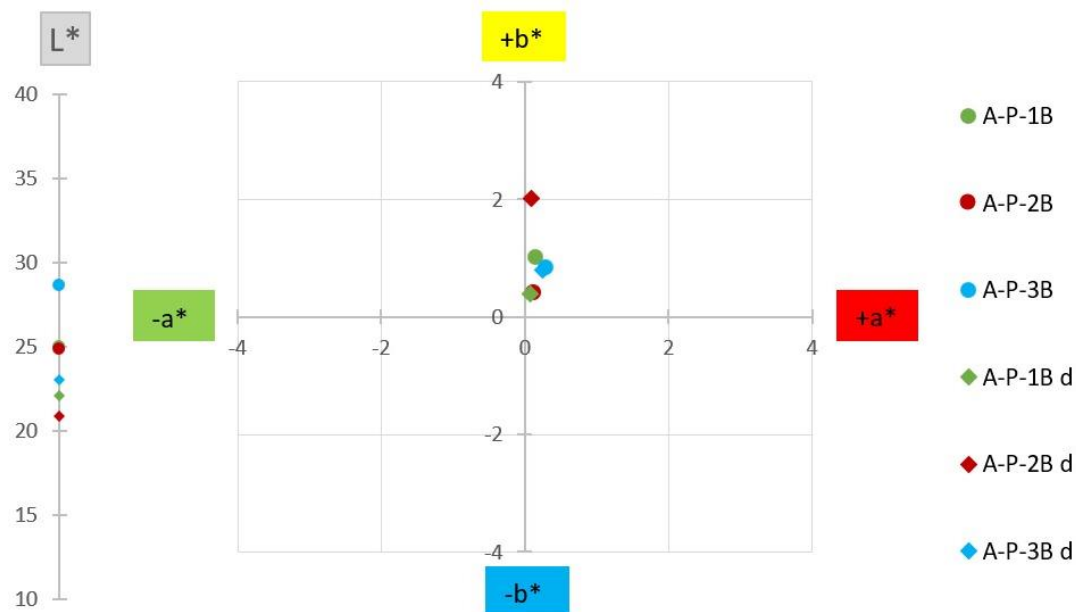


Fig. 56. Gráfico L^ , a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera blanda por impregnación e inmersión.*

La siguiente gráfica (Fig. 57) corresponde a los resultados obtenidos de las probetas de madera dura consolidadas mediante el Rexil®. Respecto a la luminosidad (L*) las probetas tienden a oscurecer, siendo las variaciones más intensificadas en el método por inmersión y menos acentuadas en las probetas consolidadas por impregnación. A nivel cromático el cambio es poco significativo, en general, se advierte una ligera disminución de la componente amarilla (+b*).

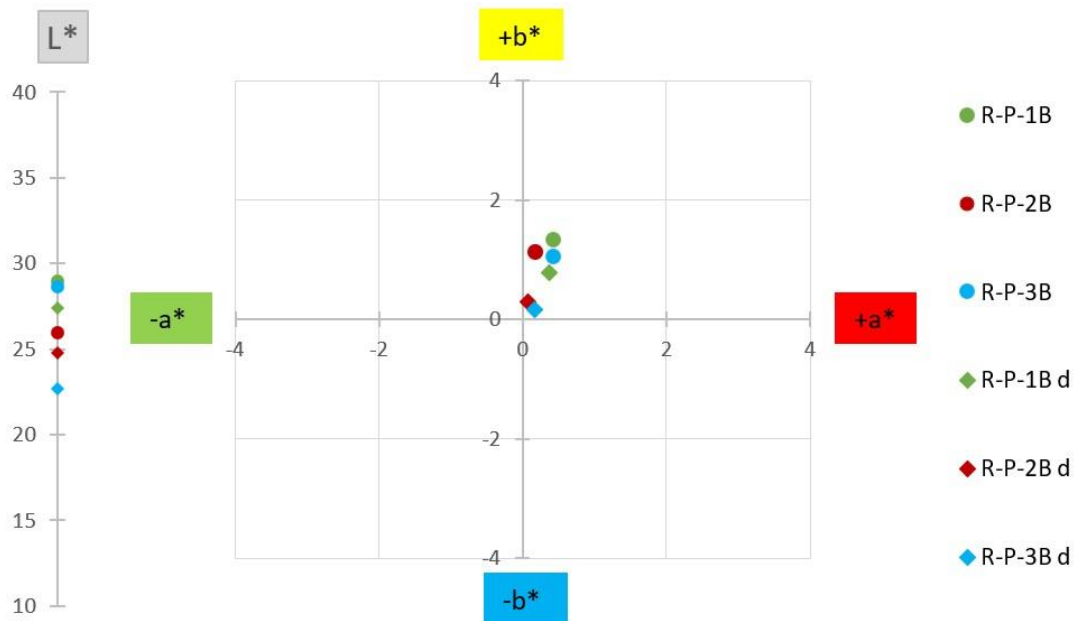


Fig. 57. Gráfico L*, a* y b* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera dura por impregnación e inmersión.

En todos los casos, las probetas han padecido variaciones cromáticas en la coordenada b*. En general, se puede advertir un aumento de la componente amarilla en las probetas consolidadas con el Acril ME®, en comparación a con las probetas tratadas con el Rexil®, que por el contrario experimentan una disminución. No obstante, estos cambios son imperceptibles al ojo humano, ya que en su mayoría no sobrepasan las dos unidades en la coordenada b*. El cambio más acentuado lo ha experimentado la probeta de madera blanda sumergida en el consolidante Acril ME®. Por lo que respecta a la coordenada (-a*), correspondiente a los componentes verde-rojo, no hay apenas diferencias respecto al antes y el después del tratamiento.

5.2.2. Fotometría

El estudio sobre las variaciones en el brillo superficial del carbón se ha llevado a cabo con un medidor de brillo. La prueba se ha realizado sobre las probetas antes y después del tratamiento y posteriormente se han obtenido las medias de los datos registrados de cada uno de los ángulos de medición.

Siguiendo la norma UNE-EN 13722 si el resultado obtenido con el ángulo de 60° es ≤ 10 unidades (bajo brillo especular) se deben de tomar los valores correspondientes al ángulo de 85° . Esto se debe a que las mediciones extraídas de las probetas de carbón presentan un nivel de brillo muy bajo⁵².

En la siguiente gráfica (*Fig. 58*) podemos observar los cambios en el brillo superficial que han experimentado los carbones tras aplicarse cada uno de los consolidantes según los dos métodos de aplicación. En general, la mayoría de las probetas parecen haber experimentado un incremento del brillo superficial. Las probetas consolidadas mediante el método de inmersión presentan un aumento notable del brillo, en especial el Rexil® en el caso de la madera más blanda. No obstante, los valores siguen siendo bajos respecto a la escala de brillo y las variaciones no son apreciables al ojo humano.

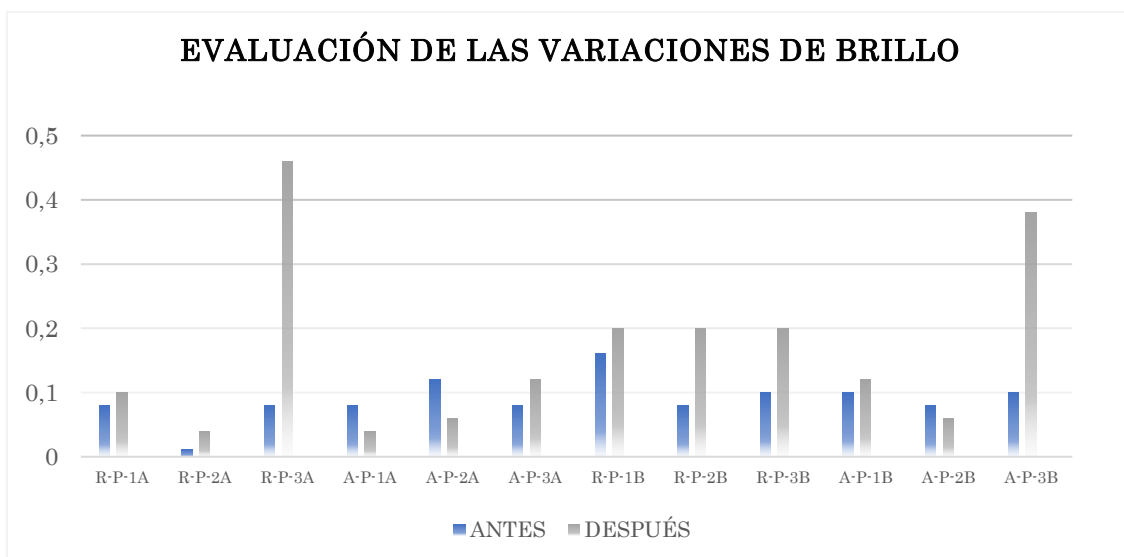


Fig. 58. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en la medición del brillo de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación.

⁵² Normativa UNE-EN 13722. *Mobiliario. Valoración del brillo superficial.* 2005

5.3. Evaluación de las propiedades mecánicas: Dureza Shore D

El ensayo de dureza permite caracterizar las propiedades mecánicas de la superficie del material y comparar su comportamiento antes y después del tratamiento de consolidación con el fin de examinar los cambios producidos por el consolidante. La evaluación de las propiedades mecánicas, como ha sido en este caso la dureza Shore, permite obtener un conocimiento sobre la resistencia física y la rigidez del material. La siguiente gráfica (Fig. 59) muestra las variaciones en las propiedades mecánicas de las probetas en cuanto a los niveles de dureza promedio registrados antes y después del tratamiento de consolidación.

De manera general, se comprueba un incremento en la dureza de las probetas tras haberse aplicado el consolidante. El aumento es en su mayoría progresivo o al menos proporcional y es más significativo en aquellas probetas donde el consolidante ha sido aplicado mediante el método de inmersión, tanto en el caso del Rexil® como del Acril ME® (R-P-3A, A-P-3A, R-P-3B y A-P-3B).

El incremento de los valores se traduce en el aporte de una mayor resistencia mecánica en cuanto a la dureza superficial de las probetas. Por lo general, la aplicación de los consolidantes no ha ocasionado un incremento dramático en cuanto a la rigidez del material tratado.

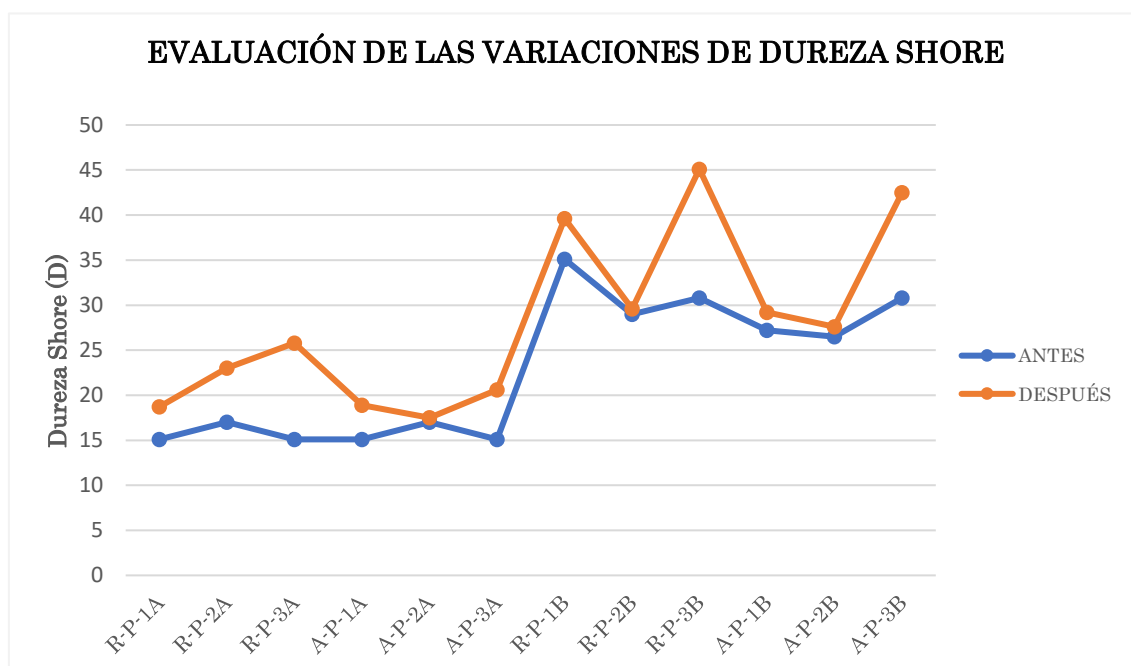


Fig. 59. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo sobre la dureza de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación.

5.4. Evaluación del comportamiento hídrico: Ensayo de la absorción de la gota

El ensayo de la absorción de la gota permite caracterizar las propiedades hídricas del material estudiado, que están relacionadas con su porosidad. Permite evaluar la rapidez del material poroso en absorber el agua y compararla frente al material consolidado para determinar los posibles cambios experimentados.

Observando las siguientes gráficas (*Figs. 60 y 61*) vemos los datos registrados sobre el tiempo que han tardado las probetas en absorber la gota antes y después de la aplicación de los consolidantes según los distintos métodos de aplicación.

Las probetas en las cuales se ha aplicado el consolidante Rexil® han experimentado un incremento del tiempo de absorción de la gota a excepción de la probeta R-P-1B. El Rexil® parece producir una mayor reducción de la porosidad del material, hecho que pudiera asociarse a que se ha empleado una mayor concentración del producto consolidante en comparación con las probetas consolidadas con el Acril ME®. En el caso de las maderas más duras (R-P-1B, R-P-2B, R-P-3B) el tiempo de absorción es elevado tanto antes como después del tratamiento superando los 60 minutos. No obstante, en el caso de las maderas más blandas (R-P-1A, R-P-2A, R-P-3A) cuyo tiempo de absorción era breve inicialmente (1-13 min.) el cambio es muy significativo superando el tiempo máximo establecido en el ensayo (60 min.). Esto puede ser ocasionado por la obstrucción del poro de la madera, hecho que ha sucedido independientemente del método de aplicación empleado.

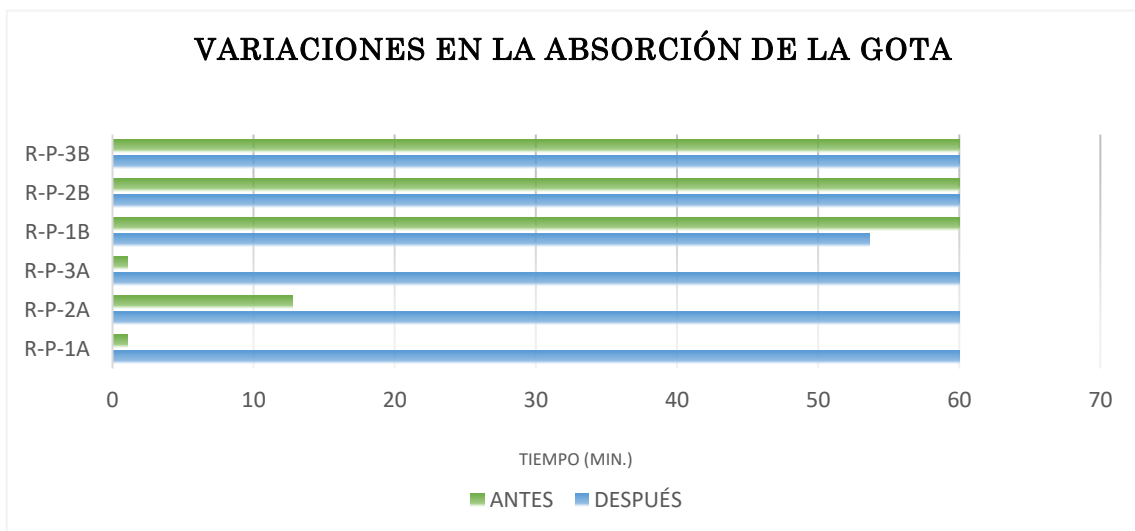


Fig. 60. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo de absorción de la gota de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación con Rexil®.

Como se observa en la siguiente gráfica (*Fig. 61*), en el caso del Acril ME® las maderas más duras (A-P-1B, A-P-2B y A-P-3B) han experimentado una disminución significativa del tiempo de absorción de la gota. El producto consolidante aplicado en la superficie del carbón ha modificado el comportamiento hídrico de las probetas provocando la disminución de la tensión superficial lo cual favorece a la humectación del soporte y, por consiguiente, la absorción del agua. En este caso se produce un fenómeno muy distinto al de las probetas consolidadas con Rexil®. En el caso de las maderas blandas (A-P-1A y A-P-3A) han padecido un ligero incremento en el tiempo de absorción de la gota tras el tratamiento, a excepción de la probeta A-P-2A. Esta disminución de la absorción puede deberse a que el consolidante ha logrado penetrar más en la estructura del material a diferencia de lo que ocurre con las probetas de madera dura donde el consolidante se ha quedado en mayor medida en superficie.

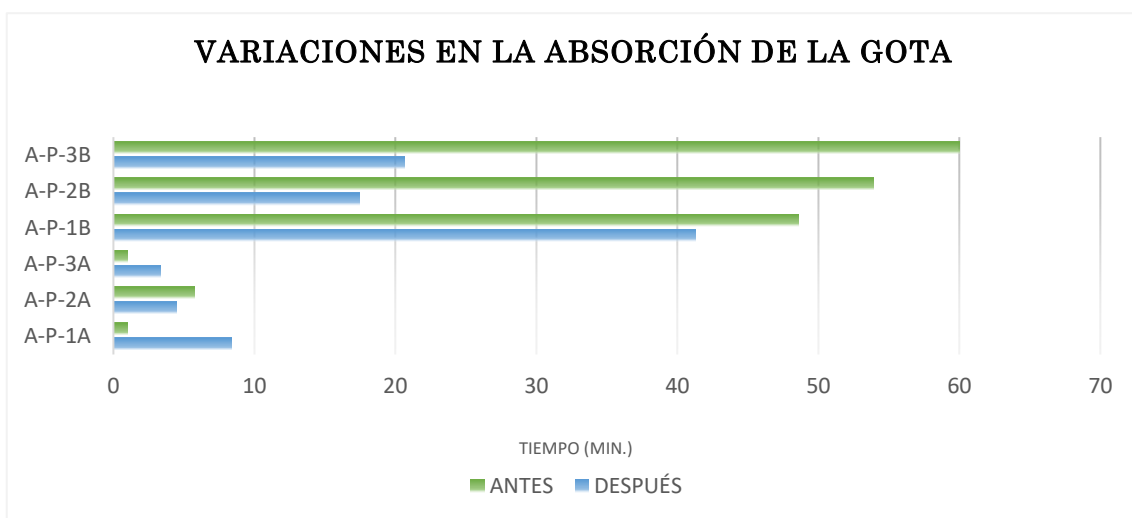


Fig. 61. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo de absorción de la gota de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación con Acril ME®.

5.5. Evaluación de la profundidad de penetración del tratamiento consolidante: Espectroscopía ATR-FTIR

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la estimación de la profundidad de penetración mediante el análisis con Espectroscopía ATR-FTIR se ha llevado a cabo en las probetas consolidadas con ambos productos mediante inmersión, ya que es la metodología que ha proporcionado mejores resultados sobre las probetas. En primer lugar, se obtuvieron los espectros infrarrojos de los tratamientos consolidantes puros, con el fin de caracterizar las bandas de absorción más características de ambos que posibiliten la detección de la presencia de estos en las probetas tratadas, estas bandas además no deben aparecer solapadas por las de los componentes propios de la madera carbonizada.

En las Figuras 62 y 63 se muestran los espectros infrarrojos del Acril ME® y del Rexil®, respectivamente:

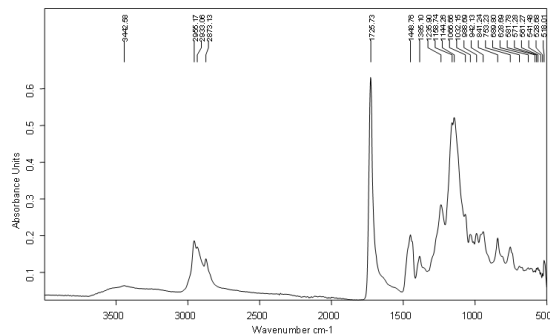


Fig. 62. Espectro infrarrojo del Acril ME®

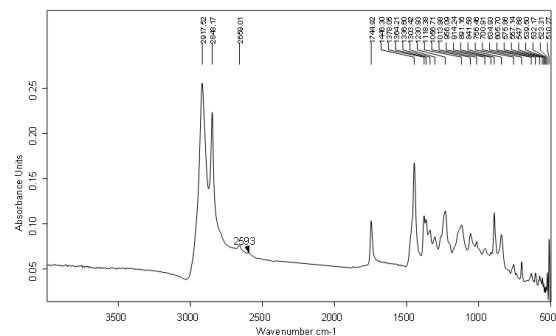


Fig. 63. Espectro infrarrojo del Rexil®

En la siguiente tabla (*Tabla 5*) se indica las bandas de absorción tomadas como referencia para la madera carbonizada y cada uno de los consolidantes testados:

Tabla 5. Selección de las bandas más representativas.

MATERIAL	POSICIÓN DE LA BANDA IR (cm ⁻¹)
MADERA CARBONIZADA	1586
REXIL®	2918
ACRIL ME®	2956

Una vez seleccionadas las bandas representativas, se procedió a realizar la estimación de la profundidad de penetración del consolidantes, para lo cual fueron extraídas y analizadas muestras a distintas profundidades. A partir de los espectros obtenidos para cada una de estas muestras se realizó el cálculo matemático del cociente de intensidades de las bandas de referencia de los consolidantes con respecto a la intensidad de la banda IR característica de la madera carbonizada. Los espectros infrarrojos obtenidos a diferente profundidad se muestran en las Figuras 64-67, donde se observan variaciones en la intensidad de las bandas características en función de la profundidad con respecto a la superficie de la madera carbonizada.

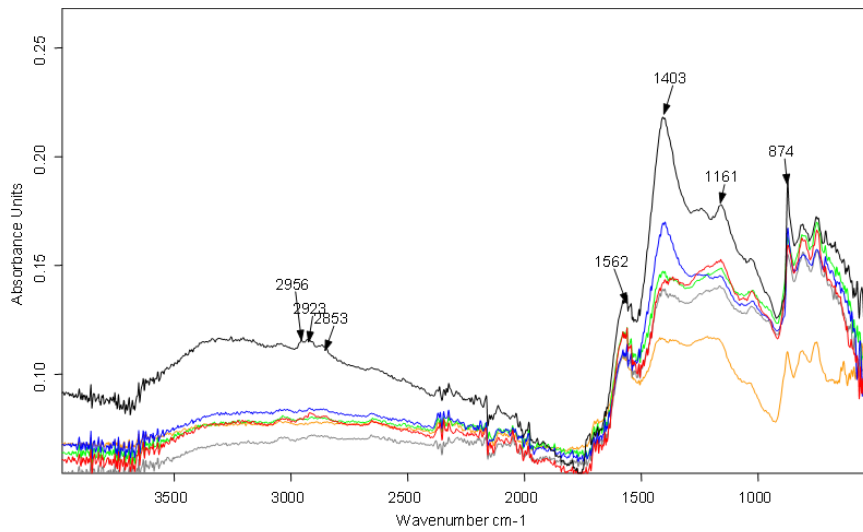


Fig. 64. Espectros infrarrojos de la probeta A-P-3A a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm.

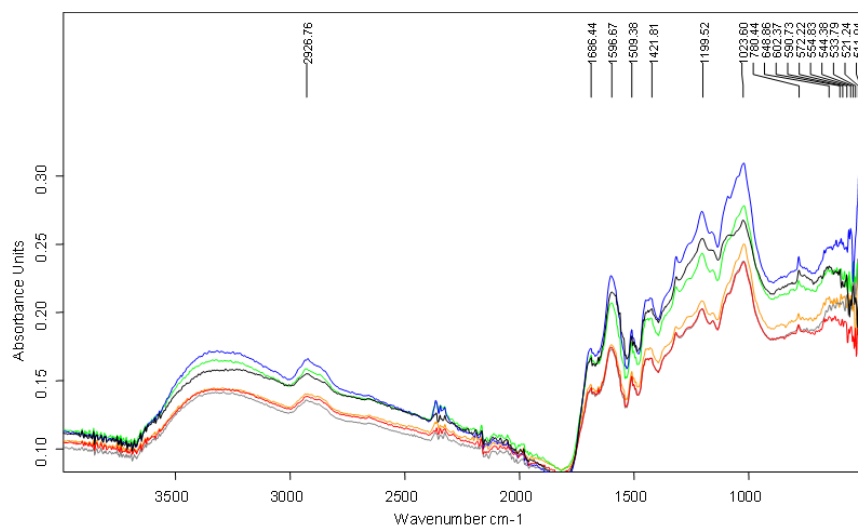


Fig. 65. Espectros infrarrojos de la probeta A-P-3B a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm.

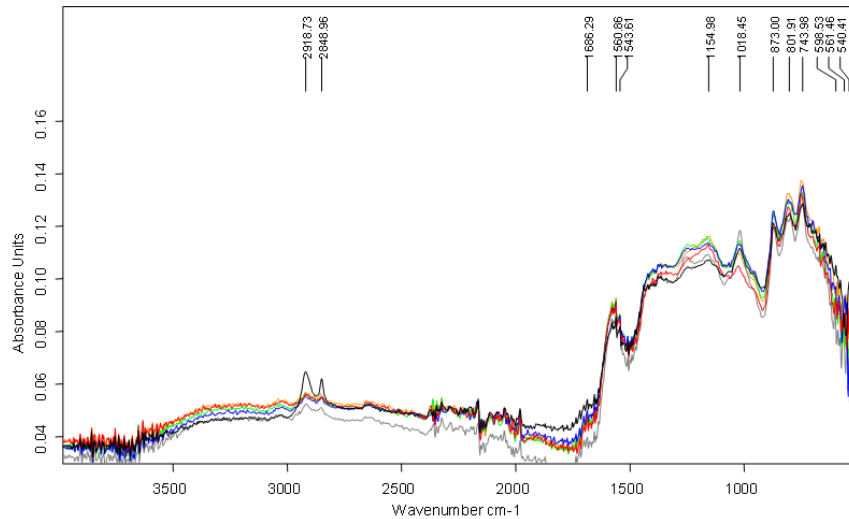


Fig. 66. Espectros infrarrojos de la probeta R-P-3A a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm.

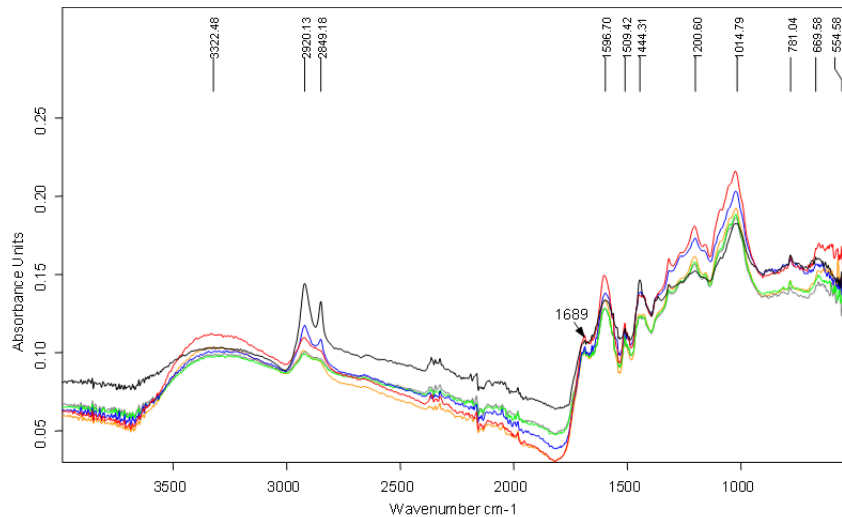


Fig. 67. Espectros infrarrojos de la probeta R-P-3B a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm.

Las muestras extraídas de cada una de las probetas a diferente profundidad han proporcionado una visión comparativa de la penetración y distribución del consolidante dentro de la estructura de madera. Los resultados obtenidos indican que el comportamiento de la madera en relación con el nivel de profundidad de penetración difiere mucho entre madera blanda y madera dura.

En la siguiente gráfica (*Fig. 68*) se muestra el nivel de profundidad de penetración del consolidante Acril ME® y del Rexil® aplicados en las probetas de madera blanda (probetas A-P-3A y R-P-3A). Como se puede observar, el Acril ME® se acumula un poco más en superficie que el Rexil® y su proporción disminuye hasta una profundidad de 8 mm. donde se vuelve a detectar un incremento. Esto se atribuye a que el fragmento de carbón en cuestión era de un espesor más reducido por lo que la muestra extraída está próxima a la superficie opuesta del fragmento de carbón, por donde ha penetrado el consolidante. Por otro lado, el Rexil® penetra a más profundidad y su contenido se mantiene más constante a lo largo de la

sección del fragmento. De estos resultados se deduce, que el Acril ME® tiene una menor capacidad de penetración.

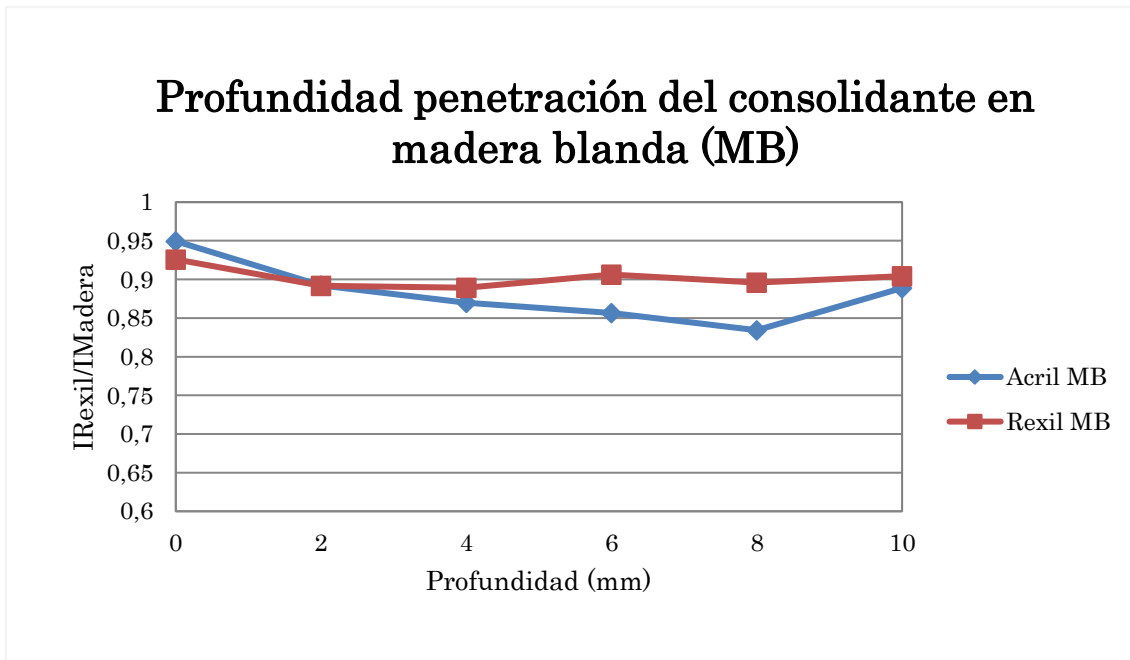


Fig. 68. Profundidad de penetración del consolidante en madera blanda (MB)

La siguiente gráfica (*Fig. 69*) corresponde a los valores de profundidad de penetración del consolidante Acril ME® y del Rexil® aplicados en las probetas de madera dura. El Acril ME® no aporta prácticamente materia consolidante mientras que el Rexil® se detecta en mayor proporción en áreas cercanas a la superficie disminuyendo paulatinamente hasta los 4 mm de profundidad. Nuevamente, el Rexil® ha presentado un mayor poder de penetración en el soporte.

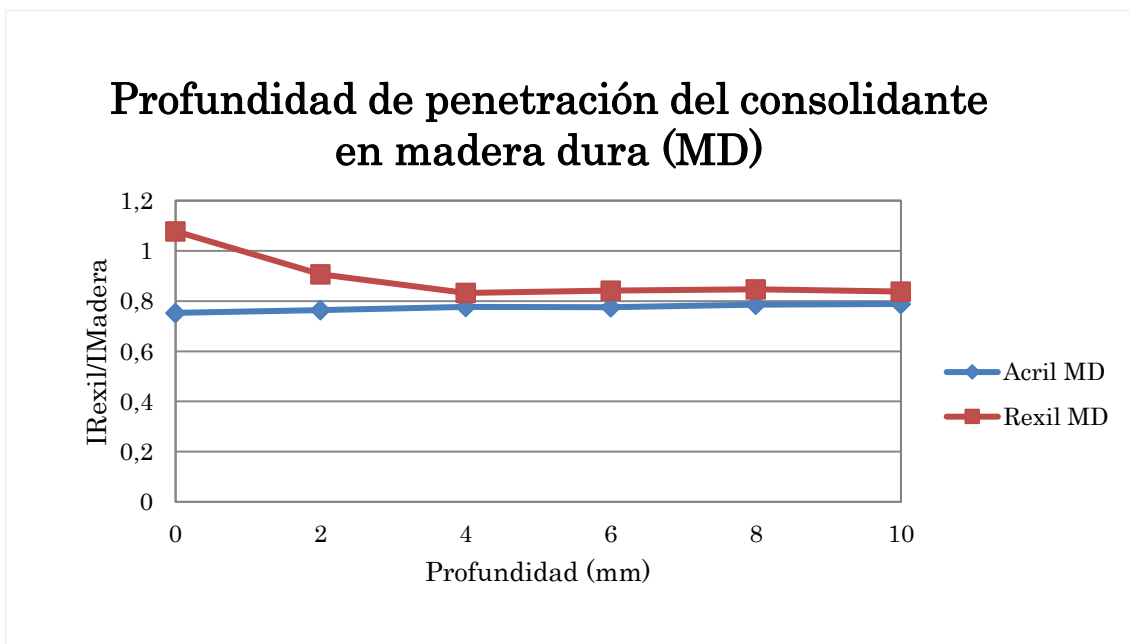


Fig. 69. Profundidad de penetración del consolidante en madera dura (MD)

Finalmente, en la siguiente tabla (*Tabla 6*), se expone el grado de adecuación de cada uno de los tratamientos y métodos de aplicación, en función de las características morfológicas, ópticas, químicas y físico-mecánicas evaluadas.

Ambos consolidantes no representan un riesgo para la preservación del material. Sin embargo, según los resultados obtenidos en los distintos ensayos, el producto Rexil® presenta un mayor nivel de idoneidad en comparación con el Acril ME®. En los estudios de colorimetría y fotometría, no se han observado cambios significativos en la apariencia superficial de las probetas, por lo que en este aspecto ambos productos se consideran muy adecuados.

En cuanto al ensayo de dureza ha habido un incremento de la resistencia mecánica y de la rigidez del material generalizado, no obstante, este aumento es más significativo en aquellas probetas tratadas por el método de inmersión.

En el caso del Acril ME® su nivel de absorción de la gota en la madera más dura es notablemente distinto en comparación con las demás probetas. En este caso, el consolidante ha supuesto el aumento significativo de la absorción del agua con respecto a los valores previos a la consolidación, lo cual se considera negativo, ya que, como consecuencia, el material se vuelve más sensible al agua, cuya acción podría producir su deterioro. Esta variación no difiere según el método de aplicación sin embargo es distinta según las propiedades físico-mecánicas del carbón. Por ello, se sugiere estudiar el fenómeno con mayor profundidad.

En cuanto al nivel de profundidad de penetración de los consolidantes ambos productos aportan materia consolidante sin embargo el Rexil® presenta una mayor capacidad de penetración.

Tabla 6. Grado de adecuación de los productos consolidantes testados.

GRADO DE ADECUACIÓN DE LOS PRODUCTOS CONSOLIDANTES TESTADOS												
CONSOLIDANTE	REXIL® a 1:1 en WS						ACRIL ME® al 5% en agua desmineralizada					
MÉTODO DE APLICACIÓN	IMPREGACIÓN A 1 APLICACIÓN		IMPREGACIÓN A 2 APLICACIONES		INMERSIÓN		IMPREGACIÓN A 1 APLICACIÓN		IMPREGACIÓN A 2 APLICACIONES		INMERSIÓN	
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS	MB*1	MD*2	MB	MD	MB	MD	MB	MD	MB	MD	MB	MD
BRILLO												
COLOR												
DUREZA												
ABSORCIÓN												
NIVEL DE PENETRACIÓN												

*1 MB: Madera blanda

*2 MD: Madera dura

Valoración sobre el grado de idoneidad	
Muy adecuado	
Se adecua, pero no como otras propuestas	
No recomendable	

6. ESTUDIO DE LAS MUESTRAS DE MADERA CARBONIZADA DE ORIGEN ARQUEOLÓGICO

La experimentación llevada a cabo en las probetas de laboratorio ha revelado que el producto consolidante más eficiente es el Rexil® y el método de aplicación óptimo es mediante la inmersión de los fragmentos. Por ello se ha seleccionado este método para el tratamiento de consolidación de los fragmentos de carbón vegetal de procedencia arqueológica.

ESTUDIO MORFOLÓGICO MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA

La siguiente serie de imágenes corresponde a las microfotografías adquiridas de la superficie de las 4 muestras de madera carbonizada de origen arqueológico del yacimiento de las termas romanas de Mura estudiadas (*Figs. 70-77*).

En la imagen previa a la consolidación de las 4 muestras (*Figuras 70, 72, 74 y 76*) se observan depósitos en la superficie del carbón que tras la consolidación han desaparecido o se han reducido debido a que antes de la consolidación se procedió a un cepillado suave de los fragmentos. Como se puede apreciar en las imágenes, no se ha producido un aumento del brillo de la superficie del material, ni cambios cromáticos apreciables. Tampoco se advierte la acumulación del consolidante en ninguna zona en particular ni la obstrucción de los canales y elementos anatómicos propios de la madera. No obstante, dada la heterogeneidad respecto al brillo del carbón en su estado inicial, se puede observar como la limpieza en seco y la consolidación proporciona un aspecto más homogéneo en el material.

M-11



Fig. 70. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (10X)



Fig. 71. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (10X)

M-12



Fig. 72. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (10X)



Fig. 73. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (10X)

En las siguientes imágenes (*Figs. 74 y 75*) correspondientes a la sección transversal de la muestra M-13 se observan los anillos con los canales resiníferos de la madera que tras la inmersión en el consolidante Rexil® no han padecido una obstrucción.

M-13

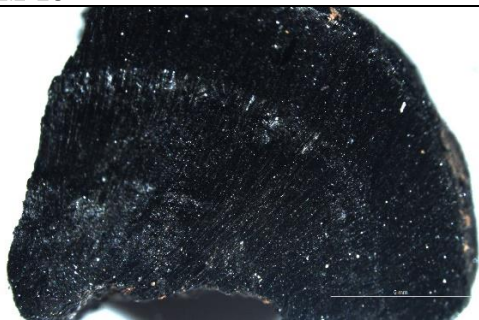


Fig. 74. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (12.5X)



Fig. 75. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (12.5X)

M-14



FIG. 76. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (10X)



FIG. 77. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (10X)

En definitiva, tanto a nivel macroscópico como microscópico, el consolidante apenas es perceptible en la superficie de las muestras, por lo que es de esperar que este no interferiría en la caracterización de la madera en el caso de que fuera necesaria.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO MEDIANTE EL ENSAYO DE LA ABSORCIÓN DE LA GOTA

El ensayo de absorción de la gota se ha realizado en las muestras de madera carbonizada antes y después de la aplicación del consolidante mediante inmersión en la solución de Rexil® en *White Spirit* 1:1. En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos (*Fig. 78*).

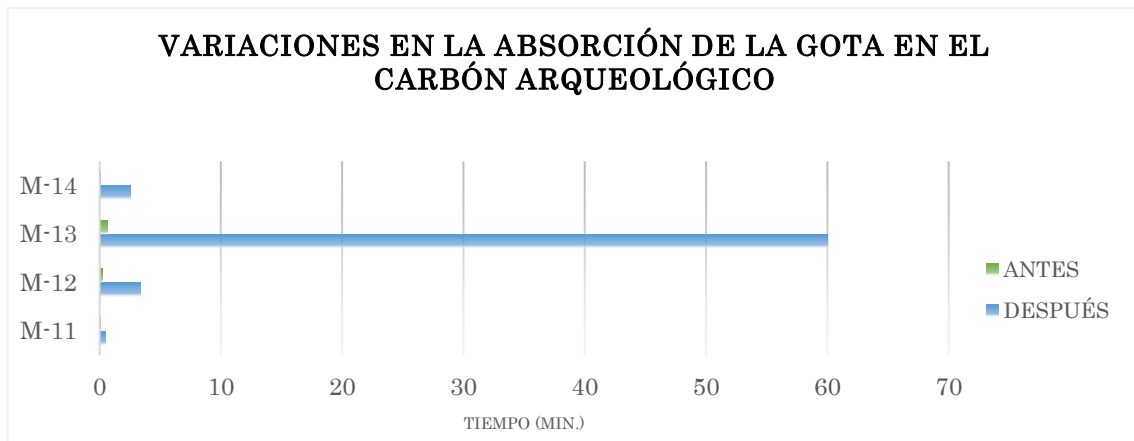


Fig. 78. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo de absorción de la gota de los fragmentos de carbón arqueológico antes y después de la consolidación.

Inicialmente las 4 muestras han absorbido las gotas depositadas en la superficie en menos de 1 min, por lo que presentan una gran porosidad. En general, se observa un incremento en el tiempo de absorción de la gota en la superficie de las muestras tras el tratamiento de consolidación. Hay que destacar, que los tiempos son muy variados, en su mayoría el aumento es poco significativo apenas superando los 2 min., sin embargo, la muestra M-13 ha experimentado un importante aumento, que supera los 60 min. este resultado se explica por las dimensiones del fragmento, pues es la muestra de menores dimensiones de todas las estudiadas, hecho que ha incrementado la penetración del consolidante a través de su red porosa por todas las caras del fragmento saturándolo. Por otro lado, se advierte que la duración de la absorción se prolonga cuando el ensayo se realiza sobre la superficie del corte transversal (Fragmento M-13) en comparación con las otras superficies donde hay una mayor homogeneidad en los resultados (Fragmentos M-11, M-12 y M-14). Esto puede relacionarse con el comportamiento anisótropo de la madera, ya que la porosidad del material difiere de manera significativa dependiendo de la sección.

7. CONCLUSIONES

Los estudios sobre los materiales de conservación y restauración y las técnicas de aplicación permiten acercarnos un poco más a la elección más idónea de estos y posibilita la elaboración de pautas aplicables a otros casos. Tras la realización de la experimentación y la obtención de los resultados de los exámenes y ensayos llevados a cabo se ha llegado a varias conclusiones.

Primeramente, los ensayos de absorción de la gota y de la dureza han proporcionado datos sobre dos tipos de propiedades físicas de la madera a partir de los cuales se ha podido determinar que el comportamiento del consolidante viene definido por las características físico-mecánicas del carbón. Por lo cual, más que la especie botánica de la madera es el grado de carbonización lo que determinará el comportamiento del producto una vez aplicado, ya que es lo que produce una mayor o menor degradación en el material.

El objetivo de la consolidación es tratar de recuperar la integridad física y estructural de los objetos considerados patrimonio con tal de prolongar su preservación a largo plazo. En el caso del carbón esto consiste en evitar su destrucción o la pérdida de material debido a su naturaleza pulverulenta y frágil. Tras el tratamiento realizado en las probetas y en el carbón arqueológico se ha observado una disminución generalizada de la pulverulencia de la superficie del material. Si bien esta ha sido más significativa en aquellos fragmentos consolidados mediante inmersión, los materiales siguen desprendiendo algunas partículas con la manipulación, en mayor medida en el caso de los fragmentos de carbón de origen arqueológico.

De esta investigación se ha comprobado que ambos productos podrían aplicarse en tratamientos de consolidación para carbón vegetal con efectividad, no obstante, tras este estudio comparativo se concluye que el tratamiento con el consolidante Rexil® ha proporcionado resultados óptimos. Por otro lado, el método de aplicación más idóneo ha resultado ser por inmersión, no solo por los resultados obtenidos en los ensayos de absorción de la gota, nivel de dureza y en la capacidad de penetración, sino porque se disminuye la pérdida de material, que por el contrario ocurre en mayor medida con la aplicación mediante impregnación con pincel. Tanto el producto que ha sido seleccionado como óptimo como la metodología de aplicación establecida pueden ser trasladados a otros casos prácticos en los cuales se presente madera carbonizada.

Comparando los resultados de este caso de estudio con los resultados obtenidos en la investigación realizada por Lucía del Olmo Cabero en su tesina de final de máster sobre el *Estudio de la eficacia de tratamientos de consolidación de madera carbonizada de origen arqueológico* se mencionan varios aspectos a considerar. En su estudio, concluye que los consolidantes que han resultado ser más idóneos en su experimentación han sido el Polivinil butyral al 10% en etanol y el Mowilith® 20 al 10% en acetona aplicados en el carbón mediante inmersión debido a su capacidad de penetración y su acabado estético superficial, ya que no proporcionan un brillo significativo. En nuestro caso de estudio, los dos productos testados (Acril ME y Rexil®) aplicados por inmersión han mostrado una mayor proporción de producto consolidante a una mayor profundidad de penetración. Con la presente investigación, por tanto, se amplía el espectro de posibilidades en cuanto al empleo de productos consolidantes de diversa naturaleza aplicables para la consolidación de madera carbonizada. Por otro lado, hay una variedad de factores que intervienen e influyen en los resultados, algunos de ellos han sido reflejados en esta experimentación, como son: Las propiedades físico-mecánicas del

material, el disolvente empleado para la dilución, el nivel de alteración del material en cuanto a fisuras y grietas ocasionado por el grado de carbonización, etc. Por otra parte se puede concluir que el método que mejores resultados proporciona en ambas investigaciones es por inmersión.

Una variable para tener en cuenta en esta clase de experimentación es el tamaño del fragmento de carbón estudiado. Cuanto más pequeño sea el fragmento de carbón el consolidante llegará a penetrar con mayor alcance en la estructura del material, como se ha podido observar en los resultados del análisis mediante Espectroscopía ATR-FTIR en el caso de la probeta A-P-3A consolidada con el producto Acril ME® (*Fig. 70*). Por otro lado, otra de las variables a considerar son los tres planos físicos de la madera ya que presentan comportamientos distintos debido a sus diferencias texturales, y podrán influir en los resultados de la investigación.

En esta experimentación, solo se preparó una concentración por cada consolidante partiendo de los resultados de otras investigaciones y considerando las especificaciones técnicas del fabricante, por lo cual, se sugiere estudiar una mayor diversidad de proporciones en cuanto a los productos consolidantes testados. En lo que respecta al producto consolidante Rexil®, si bien ha dado buenos resultados, se ha de tener en cuenta que para este estudio se ha empleado una concentración del 50%, la cual puede considerarse elevada en el caso principalmente de fragmentos de muy reducido tamaño. Por ello, se plantea como futuros estudios a continuación de esta investigación, el testado de un rango más amplio de concentraciones.

En relación con los objetivos planteados al inicio de la investigación puede concluirse en que todos han sido cumplidos con efectividad. Tras realizar una comparativa entre dos productos consolidantes aplicados sobre material lúneo carbonizado y evaluar su comportamiento a través de análisis y ensayos, se ha determinado qué producto ha ofrecido resultados óptimos y qué método de aplicación ha demostrado ser más efectivo.

Con este trabajo se contribuye en la búsqueda de los tratamientos y productos más idóneos con el fin de lograr la preservación de los bienes culturales. Por esta razón se han tenido en cuenta los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como ha sido el objetivo 11 en concreto la meta 11.4 aportando propuestas viables para la conservación de este tipo de patrimonio. Por otro lado, el estudio del carbón vegetal arqueológico permite el conocimiento sobre la composición de la vegetación que predominaba en determinadas zonas en ambientes pasados y su transformación a lo largo de los años. Esto puede contribuir a la comprensión de la historia de los ecosistemas y ayudar a tomar medidas para su conservación y restauración. Por ello, se considera que su estudio podría contribuir activamente con el objetivo 15 “Vida de ecosistemas terrestres” en específico la meta 15.2 “Para 2020, promover la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y la reforestación a nivel mundial”. Por consiguiente, puede contribuir con el objetivo 13 “Acción por el clima” a través de la meta “13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales”. Su estudio proporciona información sobre la explotación de este valioso recurso en los distintos contextos históricos y geográficos. Esto puede ayudar a la comprensión de los efectos del cambio climático del pasado y con ello abordar los desafíos climáticos actuales a partir de la elaboración de estrategias y planes de actuación eficaces. Por último, el conocimiento sobre las prácticas de uso y explotación de este recurso vegetal a lo largo del tiempo puede servir en el presente para adoptar medidas sostenibles en las prácticas de producción y consumo actuales. Por ello, podría contribuir con el objetivo 12 “Producción y consumo responsables”,

en específico con la meta “12.2 de lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales”.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Acril ME® - CTS España (cts europe.com) [en línea] [Consulta: 07-11-2023.] Disponible en: Acril ME - CTS España (ctseurope.com).
- ALONSO FELIPE, José Vicente. *Taller sobre el color y su medición*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2019. [Consulta: 27-03-2023]. Disponible en: https://oa.upm.es/42855/1/Taller_sobre_el_color_y_su_medicion.pdf
- BADAL, Ernestina. La madera. Patrimonio cultural y biológico. En: *Métode. Materia de arte. La ciencia en el estudio y la conservación del patrimonio*, Universitat de València, 2008, núm. 53. ISSN-e 1133-3987 [Consulta: 07-02-2023]. Disponible en: <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/la-madera.html>.
- BIEDMA GONZÁLEZ, Macarena. *Discriminación visual del color*. Heredia Mira, Francisco José (dir.). Trabajo Final de Grado. Grado en Óptica y Optometría, Universidad de Sevilla, 2020. [Consulta: 11-07-2023]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11441/103338>
- CARRERAS RIVERY, Raquel & PÉREZ MARÍN, Eva. *Maderas en bienes culturales europeos Identificación microscópica y casos prácticos*. 1ª ed. Universitat Politècnica de València, 2018, ISBN 9788490486290
- CARRIÓN MARCO, Yolanda. Dendrología y arqueología: las huellas del clima y de la explotación humana de la madera. En: *Avances de Arqueometría. Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría*, Universitat de Girona, 2005. [Consulta: 20-03-2023]. Disponible en: <https://www.sapac.es/actas/VI_Congreso_2005.pdf>
- CULLEN COBB, Kim. Charred wood consolidated with thermoplastic resins. En: *ANAGPIC*. Buffalo State College. Art Conservation Department, 2005. [Consulta: 23-02-2023]. Disponible en: <http://resources.conservation-us.org/anagpic-student-papers/anagpic-2005-student-papers/>
- DILOLI FONS, Jordi *et al.* El pilar de fusta de L'Assut. Conservació i restauració d'una biga de fusta arqueològica d'origen terrestre. En: *UNICUM*, 2014. núm. 13, ISSN 1579-3613.
- DOMÉNECH CARBÓ, María Teresa. *Análisis químico y examen científico de patrimonio cultural*. Madrid: Síntesis, 2018. ISBN 9788491712473
- *Eppendorf Liquid Handling Operating manual Research plus* [en línea]. Germany: Eppendorf AG, 2019 [Consulta: 29-03-2023]. Disponible en: https://www.eppendorf.com/product-media/doc/es/174967/Eppendorf_Liquid-Handling_Operating-manual_Research-plus.pdf

- ESCRIVÀ, Vicent. *Anuarios Culturales*, Archivado el 25 de septiembre de 2008. [Consulta: 15-04-2023]. Disponible en: <https://anuariosculturales.es/Monumenta%20CV/monumentacvindex.htm>
- *Espectrómetro Vertex 70* [en línea]. IRP-UPV, 2018 [Consulta: 18-04-2023]. Disponible en: <https://irp.webs.upv.es/es/espectrometro-vertex/>
- *Espectroscopia FTIR* [en línea]. Mettler Toledo [Consulta: 18-04-2023]. Disponible en: https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy.html
- ESTEBAN CHAPAPRÍA, Julià & MOLINER CANTOS, Elisa. Estudios de arquitectura romana. Las termas mayores de Mura, Lliria (Valencia). En: *Papeles del Patal: revista de restauración monumental*, 2015, núm. 7. ISSN 1695-3029
- FERNANDEZ MARTÍNEZ, Javier. *Eficacia de la consolidación de material óseo arqueológico húmedo*. Carrascosa Moliner, Begoña (dir.); Osete Cortina, Laura (dir.), Trabajo Fin de Máster. Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universitat Politècnica de València, 2022. [Consulta: 26-06-2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/186186>
- GARCÍA ESTEBAN, Luis; GUINDEO CASASÚS, Antonio. Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas. Madrid: AITIM (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho), 1989. ISBN 9788487381010
- GARCÍA ESTEBAN, Luis; GUINDEO CASASÚS, Antonio. Anatomía de frondosas españolas. Madrid: AITIM (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho), 1990. ISBN 8487381049
- HORIE, Velson. *Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings*. New York: Routledge, 2010.
- JUÁREZ VALLADARES, Eric Omar R. La madera arqueológica. Evidencias y condiciones de preservación. En: *La ciencia y el hombre*, 1998, núm. 30. ISSN: 0187-8786.
- KONICA MINOLTA. *Multi Gloss 268 Plus*. U.S.A.: Konica Minolta Business Solutions, 2017-2018. [Consulta: 27-04-2023]. Disponible en: <https://www.aquateknica.com/product/brillometro-multi-gloss-268-a/>
- LAURENCE, Ray. S. T. A. M. Mols: Wooden Furniture in Herculaneum. Form, Technique and Function. En: *The Classical Review*. Amsterdam: J. C. Gieben, vol. 50, 1999. ISBN: 90-5063-317-X.
- NAVAS O., Sayra “Horno de carbonización de laboratorio programable”, En: *Tecnología en Marcha*, 2001, vol. 13, núm. 4. ISSN 0376-3982. [Consulta: 20-03-2023]. Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1540
- OLMO CABERO, Lucia del. *Estudio de la eficacia de tratamientos de consolidación de madera carbonizada de origen arqueológico*. Domènech Carbó, María Teresa (dir.), Trabajo Fin de Máster. Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales,

Universitat Politècnica de València, 2018. [Consulta: 10-11-2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/113654>

- PIENA, Hans. Regalrez in Furniture Conservation. En: *Journal of the American Institute for Conservation*, 2001, vol. 40, núm. 1, [Consulta: 08-05-2023]. Disponible en: DOI: 10.1179/019713601806113111
- PIZZO, Benedetto, *et al.* On site consolidation of burnt and partially charred wood in dry conditions. En: *Journal of Cultural Heritage*. Mayenne: Elsevier, 2011, vol. 12. ISSN 1296-2074 [Consulta: 26-01-2023]. Disponible en : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207410000993>>
- PIQUÉ I HUERTA, Raquel. Los carbones y las maderas de contextos arqueológicos y el paleoambiente. En: *Ecosistemas*, España: Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, 2006. vol. 15, núm. 1, ISSN 1697-2473
- Rexil® - consolidante para madera - CTS España (cts europe.com) [En línea] [Consulta: 07-11-2023]. Disponible en: Rexil - CTS España (ctseurope.com).
- SCHNIEWIND, A.P. 1990. Consolidation of Dry Archaeological Wood by Impregnation with Thermoplastic Resins. En: *Advances in Chemistry Series*, Washington DC: American Chemical Society, 1990. ISBN: 0841216231
- SIERRA MÉNDEZ, Juan Luis. La conservación de la madera arqueológica subacuática. Museo y centro nacional de investigaciones arqueológicas submarinas. En: *Monte Buceiro*, Ayuntamiento de Santoña, 2003, núm. 9. ISSN 1138-9680
- SPIRYDOWICZ, Krysia E., *et al.* Alvar and Butvar: The Use of Polyvinyl Acetal Resins for the Treatment of the Wooden Artifacts from Gordion, Turkey. En: *Journal of the American Institute for Conservation*, 2001, vol. 40. ISSN: 01971360
- *Técnicas de muestreo de FTIR: Reflectancia total atenuada (ATR)* [en línea]. Thermo Fisher Scientific [Consulta: 13-04-2023]. Disponible en: Técnicas de muestreo de FTIR: Reflectancia total atenuada (ATR) | Thermo Fisher Scientific – ES.
- TORMO, Santiago. Las termas romanas de Mura en Lliria (Valencia). Un doble complejo termal y un santuario oracular único en la Hispania Citerior. En: *Anales de Edificación*, Universidad Politécnica de Madrid, 2018, vol. 4, núm. 2. ISSN 2444-1309

NORMATIVAS:

- AENORMAS. UNE-EN ISO 12647-2:2016 *Tecnología gráfica. Control del proceso para la elaboración de separaciones de color, pruebas e impresos tramados. Parte 2: Procesos litográficos offset*. 2016. [Consultado en: 09-07-2023]. Disponible en: UNE-EN ISO 12647-2:2016. (aenor.com)
- AENORMAS. UNE-EN 13722 *Mobiliario. Valoración del brillo superficial*. 2005. [Consultado en: 10-03-2023]. Disponible en: UNE-EN 13722:2005. (aenor.com)

- AENORMAS. UNE-EN 15886:2011 *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies*. 2011. [Consultado en: 09-03-2023]. Disponible en: UNE-EN 15886:2011. (aenor.com)
- AENORMAS. UNE-EN ISO 2813:2015 *Pinturas y barnices. Determinación del índice de brillo especular a 20°, 60° y 85°*. 2015. [Consultado en: 10-03-2023]. Disponible en: UNE-EN ISO 2813:2014. (aenor.com)

9. ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

<i>Figuras</i>	<i>pág.</i>
<i>Fig. 1. Planos anatómicos con los elementos característicos de las coníferas. Imagen adquirida de: GARCÍA ESTEBAN, Luis; GUINDEO CASASÚS, Antonio. Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas. Madrid: AITIM (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho), 1989. ISBN 9788487381010</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 2. Planos anatómicos con los elementos característicos de las frondosas. Imagen adquirida de: GARCÍA ESTEBAN, Luis; GUINDEO CASASÚS, Antonio. Anatomía de frondosas españolas. Madrid: AITIM (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho), 1990. ISBN 8487381049</i>	<i>10</i>
<i>Fig. 3. Esquema de la metodología planteada para la realización del trabajo. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>15</i>
<i>Fig. 4. Termas romanas de Mura. Imagen adquirida de: https://www.liria.es/es/pagina/5-termas-romanas-mura</i>	<i>17</i>
<i>Fig. 5. Termas romanas de Mura. Imagen adquirida de: https://www.comunitatvalenciana.com/es/valencia/liria/monumentos/termas-romanas-de-mura</i>	<i>18</i>
<i>Fig. 6. Fragmentos de madera carbonizada de origen arqueológico procedentes del yacimiento de las Termas Romanas de Mura: a) M-11, b) M-12, c) M-13, d) M-14. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>19</i>
<i>Fig. 7. Proceso de preparación de las muestras cortándolas mediante una sierra de mano. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 8. Vista del corte transversal a X2.0 aumentos en madera frondosa. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>20</i>
<i>Fig. 9. Imagen de las probetas con su perteneciente nomenclatura. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 10. Productos y materiales empleados para la preparación del consolidante Rexil. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 11. Productos y materiales empleados para la preparación del consolidante Acril ME. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>25</i>
<i>Fig. 12. Aplicación del consolidante sobre el fragmento mediante pincel. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>26</i>
<i>Fig. 13. Envases con los fragmentos sumergidos. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 14. Imagen de todas las probetas consolidadas. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	<i>27</i>

- Figs. 15 y 16. Imágenes del proceso de consolidación por inmersión de los fragmentos de carbón arqueológico. Autor: Claudia Salvador Núñez* 28
- Fig. 17. Imagen del proceso de obtención de imágenes mediante microscopia óptica en el laboratorio de análisis fisicoquímico del IRP, Universidad Politécnica de Valencia. Autor: Claudia Salvador Núñez* 29
- Figs. 18 y 19. Multi Gloss 268 A. Brillómetro Multi Gloss 268 Plus. <https://www.aquatecnica.com/product/brillometro-multi-gloss-268-a/>* 30
- Fig. 20. Proceso de toma de datos mediante el Espectrofotómetro CM-2000d de KONICA MINOLTAR®. Autor: Claudia Salvador Núñez* 31
- Fig. 21. Durímetro empleado. Autor: Claudia Salvador Núñez* 31
- Fig. 22. Proceso de obtención de los valores de dureza de las probetas. Autor: Claudia Salvador Núñez* 31
- Fig. 23. Instrumento Micropipeta Eppendorf research® plus. Imagen adquirida de: https://www.fishersci.es/shop/products/p/10214204?gclid=CjwKCAjw9J2iBhBPEiwAErwpedJtM6tDHRQRHdk9RM1BbLYiI2QqAsKHI3a0UTRpKqvTHbmCVy7raRoCwLAQAvD_BwE&ef_id=CjwKCAjw9J2iBhBPEiwAErwpedJtM6tDHRQRHdk9RM1BbLYiI2QqAsKHI3a0UTRpKqvTHbmCVy7raRoCwLAQAvD_BwE:G:s&ppc_id=PLA_goog_11709611996_119053376572_10214204__482365085691_1073827947817753573&ev_chn=shop&s_kwcid=AL!4428!3!482365085691!!!g!829891647741!!11709611996!119053376572* 32
- Fig. 24. Aplicación de las gotas de agua destilada sobre la superficie de las probetas. Autor: Claudia Salvador Núñez* 32
- Fig. 25. Montaje para la realización del ensayo de absorción sobre los fragmentos de carbón arqueológicos. Autor: Claudia Salvador Núñez* 32
- Fig. 26. Secado de las muestras en estufa de laboratorio Autor: Claudia Salvador Núñez* 33
- Figs. 27 y 28. Equipo de Espectroscopía ATR-FTIR Vertex 70 del laboratorio de análisis fisicoquímico del IRP, Universidad Politécnica de Valencia. Autor: Claudia Salvador Núñez* 34
- Fig. 29. Muestras extraídas de cada probeta de 0 a 1 cm de profundidad. Autor: Claudia Salvador Núñez* 34
- Fig. 30. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 35
- Fig. 31. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 35
- Fig. 32. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 36
- Fig. 33. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 36

- Fig. 34. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 36
- Fig. 35. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 36
- Fig. 36. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 36
- Fig. 37. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 36
- Fig. 38. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 37
- Fig. 39. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 37
- Fig. 40. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 37
- Fig. 41. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 37
- Fig. 42. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 37
- Fig. 43. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (20X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 37
- Fig. 44. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 38
- Fig. 45. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (16X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 38
- Fig. 46. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 38
- Fig. 47. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 38
- Fig. 48. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 38
- Fig. 49. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 38
- Fig. 50. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 39
- Fig. 51. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 39

<i>Fig. 52. Microfotografía de la superficie de la probeta antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	39
<i>Fig. 53. Microfotografía de la superficie de la probeta después de la consolidación (20X). Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	39
<i>Fig. 54. Gráfico L^*, a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera blanda por impregnación e inmersión. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	40
<i>Fig. 55. Gráfico L^*, a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera blanda por impregnación e inmersión. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	41
<i>Fig. 56. Gráfico L^*, a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera blanda por impregnación e inmersión. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	41
<i>Fig. 57. Gráfico L^*, a^* y b^* en el que se muestran los valores cromáticos de las probetas de madera carbonizada antes y después del proceso de consolidación en madera dura por impregnación e inmersión. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	42
<i>Fig. 58. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en la medición del brillo de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	43
<i>Fig. 59. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo sobre la dureza de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	44
<i>Fig. 60. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo de absorción de la gota de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación con Rexil®. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	45
<i>Fig. 61. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo de absorción de la gota de las probetas de madera carbonizada antes y después de la consolidación con Acril ME®. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	46
<i>Fig. 62. Espectro infrarrojo del Acril ME ®. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	47
<i>Fig. 63. Espectro infrarrojo del Rexil ®. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	47
<i>Fig. 64. Espectros infrarrojos de la probeta A-P-3A a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	48
<i>Fig. 65. Espectros infrarrojos de la probeta A-P-3B a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm. Autor: Claudia Salvador Núñez</i>	48

- Fig. 66. Espectros infrarrojos de la probeta R-P-3A a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm. Autor: Claudia Salvador Núñez* 49
- Fig. 67. Espectros infrarrojos de la probeta R-P-3B a diferente profundidad (0-1 cm) Línea negra: superficie, azul: 0.2 cm, verde: 0.4 cm, gris: 0.6 cm, naranja: 0.8 cm y roja: 1 cm. Autor: Claudia Salvador Núñez* 49
- Fig. 68. Profundidad de penetración del consolidante en madera blanda (MB). Autor: Claudia Salvador Núñez* 50
- Fig. 69. Profundidad de penetración del consolidante en madera dura (MD). Autor: Claudia Salvador Núñez* 50
- Fig. 70. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 52
- Fig. 71. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 52
- Fig. 72. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 52
- Fig. 73. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 52
- Fig. 74. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (12.5X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 53
- Fig. 75. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (12.5X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 53
- FIG. 76. Microfotografía de la superficie de la muestra antes de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 53
- FIG. 77. Microfotografía de la superficie de la muestra después de la consolidación (10X). Autor: Claudia Salvador Núñez* 53
- Fig. 78. Representación gráfica del promedio de los valores obtenidos en el ensayo de absorción de la gota de los fragmentos de carbón arqueológico antes y después de la consolidación. Autor: Claudia Salvador Núñez* 54

Tablas

pág.

Tabla 1. Nomenclatura final según los valores de dureza y el tiempo de absorción de la gota de las probetas: R=Rexil/A=Acril ME // P=Probeta // 1=1 Mano/2=2 Manos/3=Inmersión // A=Maderas menos duras/B=Maderas más duras. 21

Tabla 2. Análisis y ensayos realizados en cada tipo de fragmento de madera carbonizada. 22

<i>Tabla 3. Resumen sobre los tratamientos de consolidación.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 4. Resumen de los análisis y ensayos realizados para la caracterización de las probetas.</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5. Selección de las bandas más representativas.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 6. Grado de adecuación de los productos consolidantes testados.</i>	<i>51</i>

10. AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias a todas aquellas personas que han estado dispuestas a ayudarme de alguna manera u otra.

A mis dos tutoras del trabajo, la Dra. Begoña Carrascosa Moliner, profesora del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales especializada en el área de Conservación y Restauración de Material Arqueológico e investigadora en el Instituto de Restauración del Patrimonio, así como a la Dra. Laura Osete Cortina profesora del Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales especializada en el área de análisis químico analítico de Bienes Culturales; agradecerles su labor de seguimiento y por poner a mi disposición los medios necesarios para poder llevar a cabo este trabajo.

Al Museo Arqueológico de Lliria (MALL) por facilitarme los fragmentos de carbón arqueológico estudiados en esta investigación.

Agradecer a mi familia por su plena confianza en mí y su apoyo durante todo el trabajo. Por último, a mis amigas por su apoyo y su disposición a ayudarme en cualquier momento.

11. ANEXOS

11.1. ANEXO 1: Relación del trabajo con los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030



ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030

Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 2. Hambre cero.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 3. Salud y bienestar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 4. Educación de calidad.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 5. Igualdad de género.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ODS 10. Reducción de las desigualdades.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ODS 12. Producción y consumo responsables.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ODS 13. Acción por el clima.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ODS 14. Vida submarina.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster:
Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.**

Con este trabajo se contribuye en la búsqueda de los tratamientos y productos más idóneos con el fin de lograr la preservación de los bienes culturales. Por esta razón se han tenido en cuenta los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como ha sido el ODS 11 en concreto la meta 11.4 aportando propuestas viables para la conservación de este tipo de patrimonio.

Por otro lado, el estudio del carbón vegetal arqueológico permite el conocimiento sobre la composición de la vegetación que predominaba en determinadas zonas en ambientes pasados y su transformación a lo largo de los años. Esto puede contribuir a la comprensión de la historia de los ecosistemas y ayudar a tomar medidas para su conservación y restauración. Por ello, se considera que su estudio podría contribuir activamente con el objetivo 15 "Vida de ecosistemas terrestres" en específico la meta 15.2 "Para 2020, promover la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y la reforestación a nivel mundial". Por consiguiente, puede contribuir con el ODS 13 "Acción por el clima" a través de la meta "13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales". Su estudio proporciona información sobre la explotación de este valioso recurso en los distintos contextos históricos y geográficos. Esto puede ayudar a la comprensión de los efectos del cambio climático del pasado y con ello abordar los desafíos climáticos actuales a partir de la elaboración de estrategias y planes de actuación eficaces.

Por último, el conocimiento sobre las prácticas de uso y explotación de este recurso vegetal a lo largo del tiempo puede servir en el presente para adoptar medidas sostenibles en las prácticas de producción y consumo actuales. Por ello, podría contribuir con el ODS 12 "Producción y consumo responsables", a través de la meta "12.2 de lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales".

11.2. ANEXO 2: Datos obtenidos en la realización de los ensayos

- Medición del brillo de las probetas

NOMENCLATURA PROBETAS	MEDICIÓN DEL BRILLO					
	ANTES			DESPUÉS		
	20º	60º	85º	20º	60º	85º
R-P-1A	0.02	0.1	0.08	0.0	0.16	0.1
R-P-2A	0.00	0.12	0.012	0.0	0.18	0.04
A-P-1A	0.02	0.1	0.08	0.0	0.26	0.04
A-P-2A	0.00	0.12	0.12	0.0	0.22	0.06
R-P-3A	0.02	0.1	0.08	0.04	0.52	0.46
A-P-3A	0.02	0.1	0.08	0.0	0.36	0.12
R-P-1B	0.00	0.2	0.16	0.06	0.58	0.2
R-P-2B	0.01	0.1	0.08	0.0	0.32	0.2
A-P-1B	0.00	0.12	0.1	0.0	0.28	0.12
A-P-2B	0.00	0.1	0.08	0.0	0.22	0.06
R-P-3B	0.00	0.16	0.1	0.0	0.6	0.2
A-P-3B	0.00	0.16	0.1	0.0	0.4	0.38

- Estudio colorimétrico de las probetas

NOMENCLATURA PROBETAS	ESTUDIO COLORIMÉTRICO					
	ANTES			DESPUÉS		
	L	a	b	L	a	b
R-P-1A	31,809	0,553	1,739	31,809	0,226	0,44
R-P-2A	22,808	0,39	0,496	21,933	0,27	0,23
A-P-1A	27,437	0,095	0,173	20,512	0,173	0,82
A-P-2A	26,853	0,131	0,321	21,733	0,335	1,155
R-P-3A	22,82	0,13	0,385	23,56	0,091	0,097
A-P-3A	23,062	0,15	0,24	24,02	0,145	0,7
R-P-1B	28,922	0,423	1,339	27,364	0,375	0,788
R-P-2B	25,92	0,175	1,112	24,775	0,08	0,285
A-P-1B	24,948	0,146	1,018	22,075	0,07	0,391
A-P-2B	24,789	0,124	0,417	20,813	0,094	2,011
R-P-3B	26,198	0,418	1,052	22,62	0,171	0,164
A-P-3B	28,586	0,284	0,847	22,96	0,249	0,804

- Estudio de las propiedades mecánicas de las probetas: Dureza Shore D

NOMENCLATURA PROBETAS	ENSAYO DUREZA (Shore D)	
	ANTES	DESPUÉS
R-P-1A	15,1	18,7
R-P-2A	17	23
A-P-1A	15,1	18,9
A-P-2A	17	17,5
R-P-3A	15,1	25,8
A-P-3A	15,1	20,6
R-P-1B	35,1	39,6
R-P-2B	29	29,6
A-P-1B	27,2	29,2
A-P-2B	26,5	27,6
R-P-3B	30,8	45,1
A-P-3B	30,8	42,5

- *Estudio sobre el comportamiento hídrico de las probetas: Ensayo de absorción de la gota*
- *Estudio sobre el comportamiento hídrico de los carbones arqueológicos: Ensayo de absorción de la gota*

NOMENCLATURA PROBETAS	ABSORCIÓN DE LA GOTA (min.)	
	ANTES	DESPUÉS
R-P-1A	1,03 min.	+ 60 min.
R-P-2A	12,78 min.	+ 60 min.
A-P-1A	1,03 min.	8,35 min.
A-P-2A	5,75 min.	4,45 min.
R-P-3A	1,03 min.	+ 60 min.
A-P-3A	1,03 min.	3,33 min.
R-P-1B	+ 60 min.	53,66 min.
R-P-2B	+ 60 min.	+ 60 min.
A-P-1B	48,6 min.	41,28 min.
A-P-2B	53,94 min.	17,42 min.
R-P-3B	+ 60 min.	+ 60 min.
A-P-3B	+ 60 min.	20,66 min.

NOMENCLATURA CARBÓN ARQUEOLÓGICO	ABSORCIÓN DE LA GOTA (min.)	
	ANTES	DESPUÉS
M-11	0,05 min.	0,5 min.
M-12	0,25 min.	3,33 min.
M-13	0,66 min.	60 min.
M-14	0,06 min.	2,58 min.

- *Evaluación de la profundidad de penetración de los dos consolidantes aplicados en las probetas por el método de inmersión*

RESULTADOS DEL ANÁLISIS MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA-FTIR												
Profundidad (mm)	Rexil®	Madera	Rexil®/MD	Rexil®	Madera	Rexil®/MB	Acril ME®	Madera	Acril ME®/MD	Acril ME®	Madera	Acril ME®/MB
0	0,166	0,154	1,07792208	0,2	0,216	0,92592593	0,189	0,251	0,75298805	0,282	0,297	0,94949495
2	0,186	0,205	0,90731707	0,247	0,277	0,89169675	0,198	0,259	0,76447876	0,207	0,232	0,89224138
4	0,129	0,155	0,83225806	0,257	0,289	0,88927336	0,17	0,219	0,77625571	0,247	0,284	0,86971831
6	0,127	0,151	0,8410596	0,281	0,31	0,90645161	0,131	0,169	0,77514793	0,215	0,251	0,85657371
8	0,16	0,189	0,84656085	0,267	0,298	0,89597315	0,136	0,173	0,78612717	0,146	0,175	0,83428571
10	0,176	0,21	0,83809524	0,274	0,303	0,90429043	0,134	0,17	0,78823529	0,288	0,324	0,88888889